



TUGAS AKHIR - TM 141585

**STUDI EKSPERIMENTAL PROSES GERINDA
PERMUKAAN MATERIAL SKD 11 DENGAN
PENDINGINAN *MINIMUM* *QUANTITY*
*LUBRICATION (MQL)***

ADIB ABDULLAH HAFIDZ
NRP 2113106019

Dosen Pembimbing:

Ir. Bobby Oedy P. Soepangkat, M.Sc., Ph.D.

Ir. Hari Subiyanto, M.Sc.

PROGRAM SARJANA
LABORATORIUM PROSES MANUFAKTUR
JURUSAN TEKNIK MESIN
FAKULTAS TEKNOLOGI INDUSTRI
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER
SURABAYA
2017



FINAL PROJECT - TM 141586

EXPERIMENTAL STUDY OF GRINDING IN SKD 11 WITH MINIMUM QUANTITY LUBRICATION

ADIB ABDULLAH HAFIDZ
NRP 2113106019

ADVISOR:

Ir. Bobby Oedy P. Soepangkat, M.Sc., Ph.D.
Ir. Hari Subiyanto, M.Sc.

SARJANA PROGRAM
MANUFACTURING PROCES LABORATORIUM
DEPARTEMEN OF MECHANICAL ENGINEERING
FACULTY OF INDUSTRIAL TECHNOLOGY
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER
SURABAYA



2017

TUGAS AKHIR - TM 141585

**STUDI EKSPERIMENTAL PROSES GERINDA
PERMUKAAN MATERIAL SKD 11 DENGAN
PENDINGINAN *MINIMUM QUANTITY*
*LUBRICATION (MQL)***

Adib Abdullah Hafidz
NRP 2113106019

Dosen Pembimbing:

Ir. Bobby Oedy P. Soepangkat, M.Sc., Ph.D.

Ir. Hari Subiyanto, M.Sc.

PROGRAM SARJANA
LABORATORIUM PROSES MANUFAKTUR
JURUSAN TEKNIK MESIN
FAKULTAS TEKNOLOGI INDUSTRI
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER
SURABAYA
2017



FINAL PROJECT - TM 141585

EXPERIMENTAL STUDY OF GRINDING IN SKD 11 WITH MINIMUM QUANTITY LUBRICATION

Adib Abdullah Hafidz
NRP 2113106019

Advisor:
Ir. Bobby Oedy P. Soepangkat, M.Sc., Ph.D.
Ir. Hari Subiyanto, M.Sc.

SARJANA PROGRAM
MANUFACTURING PROCES LABORATORIUM
DEPARTEMEN OF MECHANICAL ENGINEERING
FACULTY OF INDUSTRIAL TECHNOLOGY
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER
SURABAYA
2017

**STUDI EKSPERIMENTAL PROSES GERINDA PERMUKAAN
MATERIAL SKD 11 DENGAN PENDINGINAN *MINIMUM*
QUANTITY LUBRICATION (MQL)**

TUGAS AKHIR

Diajukan Untuk Memenuhi Salah Satu Syarat
Memperoleh Gelar Sarjana Teknik
pada
Program Studi S-1 Jurusan Teknik Mesin
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh :

Adib Abdullah Hafidz

NRP. 2113106019

Disetujui oleh Tim Penguji Tugas Akhir :

1. Ir. Bobby Oedy Pramodyo S., M.Sc.  (Pembimbing)
Ph.D.
NIP. 195305161978031001
2. Ir. Hari Subiyanto, M.Sc.  (Penguji I)
NIP. 196006231988031002
3. Ir. Winarto, DEA.  (Penguji II)
NIP. 196012131988111001
4. Ir. Bustanul Arifin Noer, M.Sc.  (Penguji III)
NIP. 195904301989031001

SURABAYA

JULI, 2017

**STUDI EKSPERIMENTAL PROSES GERINDA
PERMUKAAN MATERIAL SKD 11 DENGAN
PENDINGINAN *MINIMUM QUANTITY*
LUBRICATION (MQL)**

Nama Mahasiswa : Adib Abdullah Hafidz
NRP : 2113106019
Pembimbing I : Ir. Bobby Oedy P Soepangkat,
M.Sc., PhD.
Pembimbing II : Ir. Hari Subiyanto, M.Sc.

ABSTRAK

Proses gerinda permukaan merupakan proses *finishing* untuk membentuk benda kerja sewaktu persyaratan yang berhubungan dengan ketelitian dan kualitas permukaan tidak bisa dicapai oleh mesin lain. Proses gerinda permukaan menghasilkan gaya dan panas yang dapat mempengaruhi kualitas permukaan benda kerja. Salah satu cara untuk meminimalkan gaya dan panas yang dihasilkan adalah dengan menggunakan *minimum quantity lubrication* (MQL). MQL merupakan salah satu penggunaan *cutting fluid* dengan volume sangat kecil. Penggunaan MQL dapat menghemat biaya dari pemakaian *cutting fluid* tanpa merubah fungsi dari *cutting fluid* itu sendiri.

Penelitian yang akan dilakukan ditujukan untuk mempelajari pengaruh metode pendingin (MQL dan *dry*), tiga level kecepatan makan (150 mm/s, 200 mm/s dan 250 mm/s), dan tiga level kedalaman potong (0,01 mm, 0,03 mm dan 0,06 mm) terhadap gaya tangensial, gaya normal, integritas permukaan benda kerja (IPBK), dan mode pembentukan geram pada proses gerinda permukaan

material baja perkakas SKD 11. Penelitian ini menggunakan rancangan eksperimen faktorial $2 \times 3 \times 3$. *Cutting fluid* yang digunakan pada metode pendinginan MQL adalah minyak nabati. Pengukuran gaya tangensial dan gaya normal dilakukan dengan menggunakan dinamometer, kekasaran permukaan diukur dengan menggunakan *surface tester*, serta analisa bentuk geram dan morfologi permukaan benda kerja dilakukan dengan mengamati foto hasil *scanning electron microscope* (SEM).

Hasil penelitian menunjukkan bahwa variabel proses gerinda permukaan yang berpengaruh signifikan terhadap gaya tangensial dan gaya normal adalah jenis pendinginan, kecepatan makan dan kedalaman potong, sedangkan yang berpengaruh terhadap kekasaran permukaan adalah jenis pendinginan, kecepatan makan dan kedalaman potong. Penggunaan MQL akan menurunkan gaya tangensial, gaya normal dan derajat *burning*, namun akan membuat permukaan benda kerja menjadi lebih kasar. Peningkatan nilai kecepatan makan akan mengurangi derajat *burning*, namun menambah gaya tangensial, gaya normal dan kekasaran permukaan. Peningkatan kedalaman potong akan menyebabkan gaya tangensial, gaya normal, kekasaran permukaan, dan derajat *burning* meningkat. Proses gerinda yang menggunakan MQL akan menghasilkan geram yang didominasi oleh bentuk-bentuk seperti *lamellar*, *leafy* dan geram yang berbentuk patahan-patahan kecil. Penggerindaan kering akan menghasilkan geram yang didominasi oleh bentuk-bentuk seperti *leafy*, *lamellar* dan *spherical*.

Kata kunci: gerinda permukaan, MQL, gaya tangensial, gaya normal, IPBK, mode pembentukan geram.

EXPERIMENTAL STUDY OF GRINDING IN SKD 11 WITH MINIMUM QUANTITY LUBRICATION

Student Name : Adib Abdullah Hafidz

NRP : 2113106019

Advisor I : Ir. Bobby Oedy P Soepangkat, M.Sc., PhD.

Advisor II : Ir. Hari Subiyanto, M.Sc.

ABSTRACT

Grinding process is a finishing process to form workpieces when requirements related to precision and surface quality can not be achieved by other machines. The grinding process produces force and heat which can affect the workpiece surface quality. One way to minimize the force and heat generated is to use minimum quantity lubrication (MQL). MQL use cutting fluid with very small volume. The use of MQL can save the a lot of cutting fluid without changing the function of the cutting fluid itself.

The research will be conducted to study the effect of cooling method (MQL and dry), three work speed levels (150 mm/s, 200 mm/s and 250 mm/s), and three levels of depth of cut (0.01 mm, 0, 03 mm and 0.06 mm) to tangential force, normal force, surface integrity and chip formation mode on grinding process of material SKD 11 tool steel. This research used factorial experimental design 2 x 3 x 3. Cutting The fluid used in the MQL is vegetable oil. Measurements of tangential and normal forces are performed using a dynamometer, surface roughness is measured using a surface tester. Analysis of chip formation mode and surface morphology by observing the photograph

of the that has been taken by scanning it with scanning electron microscope (SEM).

The results showed that in surface grinding process , variables that significantly affect the tangential and the normal force are the cooling method, feeding speed and depth of cut, while variables that significantly affect the surface roughness is the cooling method, feeding speed and depth of cut. The use of MQL will decrease the tangential style, normal force and degree of burning, but will make the workpiece surface becomes more rough. Increasing the value of the work speed will reduce the degree of burning, but increasing tangential force, normal force and surface roughness. Increasing the depth of cut will cause the tangential force, normal force, surface roughness, and burning degree increased. Grinding process that uses MQL will produce a chip formation mode such as lamellar, leafy and chips in the form of small fractures. Dry grinding will produce chip formation which is dominated by forms such as leafy, lamellar and spherical.

Keywords: grinding, MQL, tangential force, normal force, surface integrity, chip formation mode

KATA PENGANTAR

Puji syukur kehadiran Allah SWT yang telah memberikan rahmat-Nya, sehingga penulis dapat menyelesaikan tugas akhir ini. Tugas akhir ini disusun sebagai syarat untuk memperoleh gelar Sarjana pada Program Studi Proses Manufaktur, Jurusan Teknik Mesin, Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya.

Dengan selesainya penyusunan tugas akhir ini, penulis menyampaikan rasa hormat dan ucapan terima kasih yang sebanyak-banyaknya kepada:

1. Bapak Ir. Bobby Oedy P. Soepangkat, M.Sc., PhD. dan Ir. Hari Subiyanto, M.Sc. sebagai dosen pembimbing.
2. Bapak Ir. Winarto, DEA. dan Ir. Bustanul Arifin Noer, M.Sc. sebagai dosen penguji.
3. Bapak Indra Sidharta, ST., M.Sc., selaku dosen wali dan dosen penguji.
4. Bapak, ibu, kakak dan adik-adikku yang selalu memberikan semangat dan doanya untuk menyelesaikan tugas akhir ini.
5. Kepala beserta staf laboratorium manufaktur yang telah membantu saya selama mengerjakan tugas akhir ini.
6. Seluruh Dosen Jurusan Teknik Mesin FTI ITS, yang telah memberikan ilmu pengetahuannya.
7. Teman-teman yang telah membantu penulis dengan semangat maupun doanya.

8. Teman-teman satu kontrakan di bumi marina emas maupun kontrakan semolowaru yang selalu membantu penulis baik dari segi moril maupun materiil nya.

Penulis menyadari bahwa masih banyak kekurangan-kekurangan dalam penyusunan tugas akhir ini, untuk itu kritik dan saran sangat diharapkan demi kesempurnaan tugas akhir ini.

Semoga tugas akhir ini berguna bagi para pembaca.

Surabaya, Agustus 2017

Penulis

DAFTAR ISI

HALAMAN PENGESAHAN.....	i
ABSTRAK	ii
DAFTAR ISI.....	viii
DAFTAR GAMBAR	xii
DAFTAR TABEL.....	xvi
BAB 1 PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Rumusan Masalah.....	3
1.2.1 Batasan Masalah.....	3
1.2.2 Asumsi Penelitian.....	4
1.3 Tujuan Penelitian.....	4
1.4 Manfaat Penelitian.....	5
BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA DAN DASAR TEORI.....	7
2.1 Tinjauan Pustaka.....	7
2.2 Dasar Teori	9
2.2.1 Proses Gerinda.....	9
2.2.2 Batu Gerinda	11
2.2.3 <i>Balancing</i> dan <i>Dressing</i>	12
2.2.4 Mekanisme Pembentukan Geram (MPG)	13
2.2.5 Kekasaran Permukaan Benda Kerja.....	21
2.2.6 <i>Surface Burning</i>	26
2.2.7 <i>Minimum Quantity Lubrication</i> (MQL)	27
2.2.8 Langkah-Langkah dalam Desain Eksperimen..	28
2.2.9 Desain Faktorial	30
2.2.10 Analisis Variansi (ANOVA).....	31
2.2.11 Uji Distribusi F.....	33

2.2.12	Analisis Regresi.....	35
2.2.13	Uji Asumsi Residual.....	38
BAB 3 METODOLOGI PENELITIAN.....		40
3.1	Tahapan Penelitian	40
3.2	Variabel Penelitian	42
3.2.1	Variabel Bebas	42
3.2.2	Variabel Respon	42
3.2.3	Variabel Konstan.....	43
3.3	Alat dan Bahan Penelitian	43
3.3.1	Alat Penelitian	43
3.3.2	Bahan Penelitian.....	50
3.4	Prosedur Penelitian	51
3.5	Pengukuran dan Pengambilan Data	53
3.5.1	Pengukuran Kekasaran Permukaan	53
3.5.2	Pengamatan <i>Surface Burning</i>	53
3.5.3	Pengambilan Foto Bentuk Geram	54
3.6	Rancangan Percobaan.....	54
BAB 4 ANALISIS DATA DAN PEMBAHASAN		56
4.1	Data Hasil Eksperimen	56
4.2	Pengaruh Variabel Proses Terhadap Gaya Tangensial dan Gaya Normal.....	58
4.2.1	Pengaruh Variabel Proses Terhadap Gaya Tangensial	58
4.2.2	Pengujian Asumsi Residual Gaya Tangensial..	63
4.2.3	Pengaruh Variabel Proses Terhadap Gaya Normal.....	67
4.2.4	Pengujian Asumsi Residual Gaya Normal ...	72

4.3	Pemodelan Matematis Untuk Gaya Tangensial...	75
4.3.1	Uji Regresi.....	76
4.3.2	Uji Asumsi Residual.....	77
4.4	Pemodelan Matematis Untuk Gaya Normal	81
4.4.1	Uji Regresi.....	81
4.4.2	Uji Asumsi Residual.....	82
4.5	Pengaruh Variabel Proses Terhadap Kekasaran Permukaan	86
4.5.1	Pengujian Asumsi Residual Kekasaran Permukaan	90
4.6	Pemodelan Matematis Untuk Kekasaran Permukaan	95
4.6.1	Uji Regresi.....	96
4.6.2	Uji Asumsi Residual.....	97
4.7	Pengaruh Variabel Proses Terhadap <i>Surface Burning</i>	101
4.8	Pengaruh Variabel Proses Terhadap Morfologi Permukaan Benda Kerja.....	105
4.9	Pengaruh Variabel Proses Terhadap Bentuk Geram ..	109
4.10	Diskusi dan Pembahasan.....	114
BAB 5 KESIMPULAN DAN SARAN.....		118
5.1	Kesimpulan.....	118
5.2	Saran	119
DAFTAR PUSTAKA		120
LAMPIRAN		124

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Proses gerinda permukaan (Rochim, 1993) ...	10
Gambar 2.2 Kodifikasi batu gerinda (Rochim, 1993).....	12
Gambar 2.3 Tiga tipe aksi dari butiran abrasif: (a) <i>Cutting</i> (b) <i>Ploughing</i> (c) <i>Rubbing</i> (Rowe, 2009).....	14
Gambar 2.4 Lingkaran Merchant gaya pemotongan (Rochim, 1993).....	16
Gambar 2.5 Garis-garis isoterm pada geram pada waktu pemotongan berlangsung (Rochim, 1993)	19
Gambar 2.6 Geometri pahat dengan sudut geram (a) positif dan (b) negatif (Black dan Kohser, 2008)	20
Gambar 2.7 Ilustrasi proses gerinda (a) <i>up grinding</i> (b) <i>down grinding</i> (Rochim, 1993)	21
Gambar 2.8 Parameter dalam profil permukaan (Rochim, 2001).....	21
Gambar 2.9 <i>External MQL supply</i> dan <i>Internal MQL supply</i> (Klocke, 2011).....	28
Gambar 2.10 Sistem suplai MQL (Klocke, 2011)	28
Gambar 3.1 Diagram alir metode penelitian	40
Gambar 3.2 Mesin gerinda permukaan model KGS818AH	44
Gambar 3.3 Unit MQL.....	45
Gambar 3.4 Skema sistem kerja unit MQL.....	45
Gambar 3.5 Dinamometer tipe 9272	46
Gambar 3.6 <i>Data Acquisition System</i> (DAQ)	46
Gambar 3.7 <i>Charge amplifier</i> type 5070A.....	47
Gambar 3.8 <i>Notebook</i>	48
Gambar 3.9 Mitutoyo <i>surf test</i> 301	48
Gambar 3.10 <i>Scanning Electron Microscope</i> (SEM) EVO MA 10	49
Gambar 3.11 Mistar insut.....	49
Gambar 3.12 Bentuk spesimen benda kerja	50

Gambar 3.13 Daerah penggerindaan	51
Gambar 3.14 Skema pengukuran kekasaran permukaan ...	53
Gambar 4.1 Gaya tangensial (F_y) yang terjadi pada proses gerinda permukaan dengan metode pendinginan <i>dry</i> , kecepatan makan 150 mm/s dan kedalaman potong 0.01 mm.	58
Gambar 4.2 Grafik hubungan antara kedalaman potong dengan gaya tangensial dengan (a) $V_f = 150$ mm/s, (b) $V_f = 200$ mm/s dan (c) $V_f = 250$ mm/s	62
Gambar 4.3 Plot residual gaya tangensial <i>versus order</i>	63
Gambar 4.4 Plot ACF pada respon gaya tangensial	64
Gambar 4.5 Plot uji distribusi normal pada respon gaya tangensial	65
Gambar 4.6 Grafik pengaruh metode pendinginan, kecepatan makan dan kedalaman potong terhadap gaya tangensial	66
Gambar 4.7 Gaya normal (F_z) yang terjadi pada proses gerinda permukaan dengan metode pendinginan <i>dry</i> , kecepatan makan 150 mm/s dan kedalaman potong 0.01 mm.	67
Gambar 4.8 Grafik hubungan antara kedalaman potong dengan gaya normal dengan (a) $V_f = 150$ mm/s, (b) $V_f = 200$ mm/s dan (c) $V_f = 250$ mm/s	71
Gambar 4.9 Plot residual gaya normal <i>versus order</i>	72
Gambar 4.10 Plot ACF pada respon gaya normal	73
Gambar 4.11 Plot uji distribusi normal pada respon gaya normal	74
Gambar 4.12 Grafik pengaruh metode pendinginan, kecepatan makan dan kedalaman potong terhadap gaya normal	75
Gambar 4.13 Plot residual gaya tangensial <i>versus order</i> ...	78
Gambar 4.14 Plot ACF pada respon gaya tangensial	79

Gambar 4.15 Plot uji distribusi normal pada respon gaya tangensial.....	80
Gambar 4.16 Plot residual gaya normal <i>versus order</i>	83
Gambar 4.17 Plot ACF pada respon gaya normal.....	84
Gambar 4.18 Plot uji distribusi normal pada respon gaya normal.....	85
Gambar 4.19 Grafik hubungan antara kedalaman potong dengan kekasaran permukaan dengan (a) $V_f = 150$ mm/s, (b) $V_f = 200$ mm/s dan (c) $V_f = 250$ mm/s.....	90
Gambar 4.20 Plot residual kekasaran permukaan <i>versus order</i>	91
Gambar 4.21 Plot ACF pada respon kekasaran permukaan.....	92
Gambar 4.22 Plot uji distribusi normal pada respon kekasaran permukaan	93
Gambar 4.23 Grafik pengaruh metode pendinginan, kecepatan makan dan kedalaman potong terhadap kekasaran permukaan	94
Gambar 4.24 Plot residual kekasaran permukaan <i>versus order</i>	98
Gambar 4.25 Plot ACF pada respon kekasaran permukaan.....	99
Gambar 4.26 Plot uji distribusi normal pada respon kekasaran permukaan	100
Gambar 4.27 <i>Surface burning</i> pada proses gerinda permukaan dengan metode pendinginan <i>dry</i> , (a) kecepatan makan 150 mm/s, (b) kecepatan makan 200 mm/s, (c) kecepatan makan 250 mm/s.	102
Gambar 4.28 <i>Surface burning</i> pada proses gerinda permukaan dengan metode pendinginan MQL, (a) kecepatan makan 150 mm/s, (b) kecepatan makan 200 mm/s, (c) kecepatan makan 250mm/s.	102

Gambar 4.29	Foto morfologi permukaan benda kerja dengan pendinginan <i>dry</i> , kecepatan makan 250 mm/s dan kedalaman potong 0,03 mm.	106
Gambar 4.30	Foto morfologi permukaan benda kerja dengan pendinginan <i>dry</i> , kecepatan makan 250 mm/s dan kedalaman potong 0,06 mm.	107
Gambar 4.31	Foto morfologi permukaan benda kerja dengan pendinginan MQL, kecepatan makan 250 mm/s dan kedalaman potong 0,03 mm.	108
Gambar 4.32	Foto morfologi permukaan benda kerja dengan pendinginan MQL, kecepatan makan 250 mm/s dan kedalaman potong 0,06 mm.	109
Gambar 4.33	Foto SEM geram dengan metode pendinginan <i>dry</i> , kecepatan makan 250 mm/s dan kedalaman potong 0,03 mm.	110
Gambar 4.34	Foto SEM geram dengan metode pendinginan <i>dry</i> , kecepatan makan 250 mm/s dan kedalaman potong 0,06 mm.	111
Gambar 4.35	Foto SEM geram dengan metode pendinginan MQL, kecepatan makan 250 mm/s dan kedalaman potong 0,03 mm.	113
Gambar 4.36	Foto SEM geram dengan metode pendinginan MQL, kecepatan makan 250 mm/s dan kedalaman potong 0,06 mm.	114

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Angka kekasaran dan panjang sampel standar...	25
Tabel 2.2 Nilai kekasaran yang dicapai oleh beberapa pengerjaan	26
Tabel 2.3 Rancangan penelitian desain faktorial	31
Tabel 2.4 Tabel analisis variansi (ANAVA) dua arah	32
Tabel 3.1 Rancangan percobaan.....	55
Tabel 4.1 Data hasil eksperimen gerinda permukaan	57
Tabel 4.2 Analisis variansi (ANAVA) variabel proses terhadap gaya tangensial.	59
Tabel 4.3 Kondisi hipotesis nol pada respon gaya tangensial	60
Tabel 4.4 Hasil uji Tukey pada metode pendinginan.....	60
Tabel 4.5 Hasil uji Tukey pada kecepatan makan.....	61
Tabel 4.6 Hasil uji Tukey pada kedalaman potong	61
Tabel 4.7 Analisis variansi (ANAVA) variabel proses terhadap gaya normal.	67
Tabel 4.8 Kondisi hipotesis nol pada respon gaya tangensial	69
Tabel 4.9 Hasil uji Tukey pada metode pendinginan.....	69
Tabel 4.10 Hasil uji Tukey pada kecepatan makan.....	69
Tabel 4.11 Hasil uji Tukey pada kedalaman potong	70
Tabel 4.12 Hasil ANAVA untuk gaya tangensial	76
Tabel 4.13 Koefisien regresi untuk model gaya tangensial	76
Tabel 4.14 Hasil ANAVA untuk gaya normal.....	81
Tabel 4.15 Koefisien regresi untuk model gaya normal	81
Tabel 4.16 Analisis variansi (ANAVA) variabel proses terhadap kekasaran permukaan	86
Tabel 4.17 Kondisi hipotesis nol pada respon kekasaran permukaan	87
Tabel 4.18 Hasil uji Tukey pada metode pendinginan.....	88
Tabel 4.19 Hasil uji Tukey pada kecepatan makan.....	88

Tabel 4.20 Hasil uji Tukey pada kedalaman potong	88
Tabel 4.21 Hasil ANAVA untuk kekasaran permukaan	96
Tabel 4.22 Koefisien regresi untuk model kekasaran permukaan	96
Tabel 4.23 Klasifikasi derajat <i>burning</i>	103
Tabel 4.24 Data derajat <i>burning</i> hasil eksperimen.....	104

BAB 1

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Proses gerinda permukaan adalah suatu proses pemesinan yang penting yang digunakan sebagai proses akhir (*finishing*) untuk membentuk benda kerja sesuai dengan geometri, dimensi-dimensi dan toleransi-toleransi yang telah ditentukan. Proses gerinda digunakan sewaktu persyaratan yang berhubungan dengan ketelitian dan kualitas permukaan tidak bisa dicapai oleh mesin lain, seperti freis dan bubut. Proses ini menggunakan batu gerinda (*grinding wheel*) sebagai alat potong. Batu gerinda dibuat dari serbuk abrasif yang diikat dengan bahan pengikat tertentu. Proses gerinda mempunyai kecepatan penghasilan geram yang rendah, sehingga toleransi geometrik dengan rentan yang sempit dapat dicapai, serta diperoleh permukaan benda kerja yang sangat halus. Proses gerinda dapat juga diaplikasikan untuk berbagai kekerasan material, bahkan material yang sudah dikeraskan sekalipun.

Penggerindaan menghasilkan gaya dan panas yang mempengaruhi integritas permukaan benda kerja (IPBK), maka proses ini biasanya memakai *cutting fluid* dengan pendinginan konvensional (*flood cooling*) untuk meminimalisir gaya dan panas yang ditimbulkan oleh gesekan antara batu gerinda dengan benda kerja. Selain untuk menurunkan panas dan gaya pada proses gerinda, *cutting fluid* juga berfungsi untuk membawa geram dan melumasi serta melindungi benda kerja dan komponen mesin dari korosi. Disisi lain, penggunaan *cutting fluid* secara *flooding* menimbulkan efek negatif dari segi lingkungan dan bertambahnya biaya untuk perawatan. Salah

satu efek negatif dari segi lingkungan yaitu polusi dari pembuangan cairan yang telah digunakan maupun menurunnya kesehatan dari operator (Park dkk., 2010). Salah satu cara untuk meminimalkan dampak negatif dari segi ekonomi maupun lingkungan adalah dengan menggunakan proses *minimum quantity lubrication* (MQL). MQL merupakan salah satu cara penggunaan *cutting fluid* dengan volume yang sangat kecil, biasanya kurang dari 30 ml/jam (Braga dkk., 2001).

Leonardo dkk. (2006) meneliti tentang pengaruh MQL terhadap proses gerinda. Variabel-variabel yang digunakan adalah kecepatan batu gerinda (v_s), *infeed rate* (v_f), kecepatan benda kerja (v_w), kedalaman potong (a) dan *spark-out time* (t_s). Dari eksperimen yang telah dilakukan, didapatkan bahwa MQL bisa diaplikasikan secara efisien pada proses gerinda. Sadeghi dkk. (2010) meneliti tentang pengaruh MQL terhadap proses gerinda pada material AISI 4140 yang telah dikeraskan. Variabel-variabel yang digunakan adalah kecepatan batu gerinda (v_s), kecepatan benda kerja (v_w), kedalaman potong (a_c), MQL *flow rate* (Q), tekanan udara pada MQL (P) dan jenis *cutting fluid*. Dari eksperimen yang telah dilakukan, didapatkan bahwa gaya tangensial dan gaya normal yang terjadi pada proses gerinda dengan menggunakan MQL lebih rendah dibandingkan yang menggunakan *flood cooling*. Tawakoli dkk. (2009) meneliti tentang penggunaan MQL pada proses gerinda. Variabel-variabel yang digunakan meliputi kecepatan potong (v_c), kecepatan makan (v_f), kedalaman potong (a), kondisi pemesinan dan material benda kerja yang digunakan. Hasil yang diperoleh adalah kualitas permukaan akhir secara signifikan lebih baik ketika teknik MQL digunakan pada proses penggerinda dengan material benda kerja 100Cr6,

sedangkan pada penggeridaan material benda kerja 42CrMo4 permukaan akhir lebih baik ketika teknik pendinginan konvensional digunakan.

Untuk mengetahui lebih lanjut efektifitas dari penggunaan MQL, maka akan dilakukan penelitian tentang pengaruh MQL dan variabel-variabel proses terhadap gaya tangensial, gaya normal, integritas permukaan benda kerja (IPBK) dan mode pembentukan geram pada proses gerinda permukaan. Variabel-variabel proses yang digunakan meliputi metode pendinginan, kedalaman potong (a) dan kecepatan makan (v_f). Material benda kerja yang digunakan pada penelitian ini adalah SKD 11. Rancangan eksperimen yang digunakan adalah rancangan faktorial $2 \times 3 \times 3$. Metode analisis yang akan digunakan untuk mengetahui pengaruh dari metode pendinginan, kedalaman potong (a) dan kecepatan makan (v_f) terhadap gaya tangensial, gaya normal dan kekasaran permukaan adalah analisis variansi (ANAVA). *Scanning electron microscope* (SEM) akan digunakan untuk melakukan analisis mode pembentukan geram dan morfologi permukaan benda kerja.

1.2 Rumusan Masalah

Dari uraian latar belakang yang telah dijelaskan, maka permasalahan yang dapat dirumuskan adalah bagaimana pengaruh dari MQL dan variabel-variabel proses gerinda permukaan terhadap gaya tangensial, gaya normal, IPBK dan mode pembentukan geram.

1.2.1 Batasan Masalah

Batasan masalah yang diberlakukan dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Tidak membahas masalah biaya selama proses pemesinan.
2. Penelitian dilakukan dengan menggunakan mesin gerinda permukaan model KGS818AH.
3. Proses gerinda dilakukan dengan menggunakan media pendinginan berupa minyak nabati dan tanpa pendingin.
4. Menggunakan batu gerinda dengan pengulangan pengasahan.
5. Pengambilan foto SEM untuk bentuk geram dan morfologi permukaan benda kerja diambil secara acak.

1.2.2 Asumsi Penelitian

Adapun asumsi-asumsi yang diberlakukan dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Faktor-faktor yang tidak diteliti dianggap tidak berpengaruh terhadap penelitian.
2. Benda kerja dan batu gerinda memiliki komposisi kimia yang homogen.
3. Temperatur pemesinan dianggap normal pada temperatur ruang.
4. Mesin dan operator bekerja dalam kondisi yang baik.
5. Alat ukur yang digunakan dalam kondisi yang layak dan terkalibrasi.

1.3 Tujuan Penelitian

Tujuan dari penelitian ini adalah untuk mengetahui dan memahami pengaruh MQL dan variabel-variabel proses terhadap gaya tangensial, gaya normal, IPBK dan mode pembentukan geram pada proses gerinda permukaan.

1.4 Manfaat Penelitian

Kontribusi atau manfaat yang dapat diberikan melalui penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Meningkatkan pengetahuan tentang proses gerinda permukaan yang membahas pengaruh MQL dan variabel-variabel proses terhadap gaya tangensial, gaya normal, kekasaran permukaan benda kerja, IPBK dan mode pembentukan geram pada proses gerinda permukaan.
2. Sebagai bahan referensi bagi penelitian selanjutnya dalam rangka pengembangan tentang pengaruh MQL dan variabel-variabel proses terhadap gaya tangensial, gaya normal, IPBK dan mode pembentukan geram pada proses gerinda permukaan.

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

BAB 2

TINJAUAN PUSTAKA DAN DASAR TEORI

2.1 Tinjauan Pustaka

Proses gerinda permukaan merupakan proses abrasif pada permukaan benda kerja dengan menggunakan batu gerinda yang berputar. Proses tersebut akan menghasilkan benda kerja dengan kualitas yang baik jika ditambahkan *cutting fluid* pada saat proses berlangsung. Tujuan utama dari cairan tersebut adalah sebagai pelumasan, pendinginan, transportasi geram dan meminimalkan korosi. Meskipun *cutting fluid* berpengaruh dalam menghasilkan benda kerja yang berkualitas, menggunakan cairan tersebut juga memiliki dampak negatif bagi lingkungan dan operator. Salah satu cara yang dapat digunakan untuk menyelesaikan permasalahan tersebut adalah mengganti *cutting fluid* dengan MQL.

Leonardo dkk. (2006) menganalisa IPBK pada proses gerinda dengan menggunakan MQL. Variabel-variabel yang digunakan adalah kecepatan batu gerinda ($v_s = 30$ m/s), *infeed rate* ($v_f = 1$ mm/min), kecepatan makan ($v_w = 20$ m/min), kedalaman potong ($a = 0.1$ mm) dan *spark-out time* ($t_s = 10$ s) dengan material benda kerja ABNT 4340 (60 HRC). Benda kerja diukur setelah dilakukan penggerindaan sebanyak 90 *cycles*. Batu gerinda yang digunakan dalam percobaan tersebut adalah batu gerinda *aluminum oxide* dengan kode 38A60KV. Unit MQL yang mereka gunakan berasal dari Accu-lube dengan *nozzle* yang di desain oleh Leonardo dkk. Metode pendinginan yang dilakukan pada penelitian ini ada 3 macam yaitu pendinginan dengan MQL, pendinginan konvensional (*flooding*) dan tanpa pendinginan (*dry*). Dari eksperimen yang telah dilakukan, didapatkan

bahwa penggunaan MQL bisa diaplikasikan pada proses gerinda secara efisien, tidak ada efek negatif yang ditimbulkan pada permukaan benda kerja (*surface integrity*), dengan nilai kekasaran permukaan R_a (μm) paling rendah diantara pendinginan yang lainnya dan nilai *residual compressive stress* paling besar diantara pendinginan lainnya (± 370 MPa).

Tawakoli dkk. (2009) menganalisis pengaruh MQL terhadap proses gerinda. Variabel-variabel yang digunakan meliputi kecepatan batu gerinda (20 m/s, 25 m/s dan 30 m/s), kecepatan makan (2.5 m/min, 5 m/min dan 10 m/min), kedalaman potong (5 μm , 10 μm , 15 μm dan 25 μm), kondisi pemesinan (*dry*, *flood* dan MQL) dan material benda kerja (100Cr6 *hardened steel* dengan kekerasan 50 HRC dan 42CrMo4 *soft steel* dengan kekerasan 80 HRB). Pada penelitian tersebut digunakan batu gerinda tipe 22A4618V300. Metode penelitian ini menggunakan tiga teknik pendinginan, yaitu MQL (LB 8000), pendinginan konvensional (*cutting fluid* Castrol Syntilo 2000 dengan konsentrasi 5%), dan udara bertekanan (*air pressure* 4bar). Penggerindaan material jenis 100Cr6 *hardened steel* dengan menggunakan MQL akan menghasilkan kekasaran permukaan akhir yang lebih rendah dari pada kekasaran permukaan hasil penggerindaan dengan menggunakan pendinginan yang lain. Penggerindaan material jenis 42CrMo4 *soft steel* dengan menggunakan teknik MQL akan menghasilkan kekasaran permukaan yang lebih tinggi dibandingkan dengan menggunakan pendinginan yang lain.

Sadeghi dkk. (2010) menganalisis pengaruh beberapa *cutting fluids* pada proses gerinda dengan menggunakan teknik MQL terhadap material AISI 4140 yang telah dikeraskan. Variabel-variabel yang digunakan adalah

kecepatan makan (10 m/min, 20 m/min, 30 m/min dan 40 m/min), kedalaman potong (0,005 mm, 0,010 mm dan 0,015 mm), MQL *flow rate* (15 ml/hr, 20 ml/hr, 30 ml/hr, 40 ml/hr, 50 ml/hr, 60 ml/hr, 70 ml/hr, 100 ml/hr dan 140 ml/hr), tekanan udara MQL (2 bar, 3 bar, 4 bar, 5 bar dan 6 bar). Metode pendinginan yang dilakukan pada penelitian ini ada 3 macam, yaitu pendinginan dengan MQL (*vegetable oil*, *synthetic oil*, *Behran cutting oil 34* dan *Behran cutting oil 53*), pendinginan konvensional (*flooding*; 8,4 l/min; *Soluble oil* Blaser BC35 dengan konsentrasi 5%) dan tanpa pendinginan (*dry*). Jenis batu gerinda yang digunakan adalah *aluminum oxide* dengan kode 91A46I8AV. Dari eksperimen yang telah dilakukan, didapatkan hasil penggerindaan AISI 4140 dengan metode MQL menghasilkan gaya tangensial dan normal yang lebih rendah dibandingkan dengan metode pendinginan yang lainnya.

2.2 Dasar Teori

2.2.1 Proses Gerinda

Proses pemesinan seringkali tidak menghasilkan benda kerja dengan tingkat kekasaran atau akurasi dimensi yang diharapkan. Salah satu proses yang bisa digunakan untuk menghasilkan karakteristik tersebut adalah dengan proses gerinda. Proses gerinda dilaksanakan dengan mesin gerinda yang menggunakan pahat berupa batu gerinda berbentuk piringan (*grinding wheel/disk*). Batu gerinda ini dibuat dari campuran serbuk abrasif dan bahan pengikat dengan komposisi dan struktur tertentu. Batu gerinda yang dipasang pada poros utama berputar dengan kecepatan periferil tertentu tergantung pada diameter batu gerinda dan putarannya. Kecepatan periferil pada tepi batu gerinda dapat dihitung menggunakan rumus sebagai berikut (Rochim, 1993):

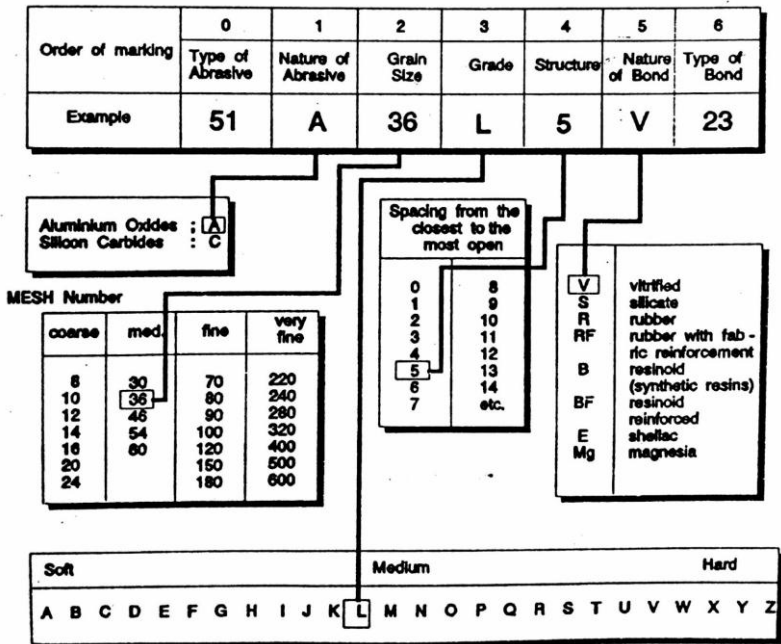
l_v	: Panjang langkah pengawalan (mm)
l_w	: Panjang penggerindaan (mm)
l_n	: Panjang langkah pengakhiran (mm)
d_s	: Diameter batu gerinda (mm)
n_s	: Putaran batu gerinda (r/m)
b_s	: Lebar batu gerinda (mm)
a	: Kedalaman penggerindaan (mm)
w	: Lebar benda kerja (mm)

2.2.2 Batu Gerinda

Batu gerinda memegang peranan utama sebagai alat potong dalam proses gerinda permukaan. Batu gerinda harus dipilih dengan seksama berdasarkan bentuk, dimensi dan jenisnya supaya proses gerinda dapat dilaksanakan dengan baik. Untuk membantu dalam pemilihan jenis batu gerinda, maka *International Organization for Standardization* (ISO) merekomendasikan pemakaian jenis batu gerinda yang telah distandarkan pada ISO 525-1975E. Berdasarkan ISO 525-1975E, setiap batu gerinda memiliki kode tertentu yang berisi informasi mengenai spesifikasi dari batu gerinda. Kode tersebut merupakan tanda yang harus ada pada batu gerinda, yang terdiri dari 7 kelompok huruf dan angka. Ketujuh kelompok tersebut secara berurutan, yaitu:

- 0 Spesifikasi serbuk abrasif, sesuai dengan klasifikasi lebih lanjut dari pabrik pembuat,
- 1 Jenis serbuk abrasif,
- 2 Ukuran serbuk abrasif,
- 3 Kekerasan atau kekuatan ikatan,
- 4 Struktur,
- 5 Jenis bahan pengikat,
- 6 Spesifikasi bahan pengikat,

Contoh dari ketujuh kelompok huruf dan angka tersebut dapat dilihat pada Gambar 2.2 berikut (Rochim, 1993):



Gambar 2.2 Kodifikasi batu gerinda (Rochim, 1993)

2.2.3 *Balancing dan Dressing*

Proses pemasangan batu gerinda pada mesin gerinda harus seimbang, karena apabila tidak seimbang dapat menghasilkan permukaan benda kerja yang kurang halus, mempercepat kerusakan bantalan mesin gerinda, serta menyebabkan batu gerinda pecah pada putaran tinggi yang

dapat merusak mesin dan membahayakan operator. Proses *balancing* dilakukan pada kecepatan putaran batu gerinda yang rendah dan akurasi menengah, dengan cara statis menggunakan spindel tiruan, yang memungkinkan untuk memutar dan mengetahui posisi yang seimbang di batu gerinda (Rowe, 2009).

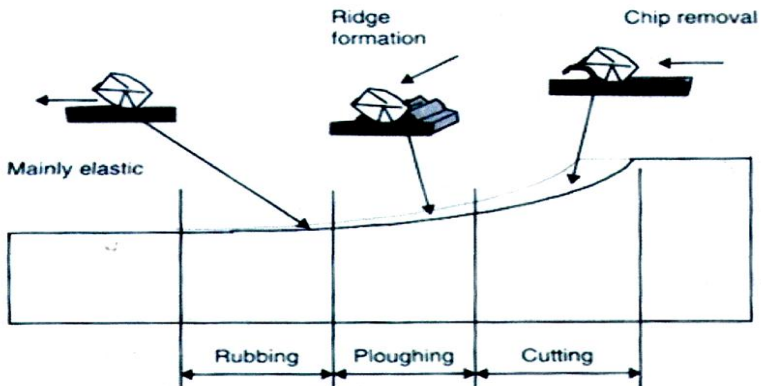
Batu gerinda yang dipakai terus menerus semakin lama akan menjadi tumpul, sehingga menyebabkan proses penggerindaan menjadi tidak optimal. Untuk mengoptimalkan kembali proses penggerindaan, maka perlu dilakukan proses *dressing* pada batu gerinda tersebut. Fungsi dari proses *dressing* adalah sebagai berikut (Rowe, 2009):

- Untuk memperoleh sisi potong yang tajam dan menyeluruh pada ujung batu gerinda.
- Untuk mengikis perekat disekitar serbuk abrasif, sehingga serbuk abrasif lebih terbuka pada permukaan batu gerinda.
- Untuk mengikis lapisan batu gerinda yang memuat material benda kerja.

2.2.4 Mekanisme Pembentukan Geram (MPG)

Mekanisme pembentukan geram pada proses gerinda permukaan sama seperti mekanisme pembentukan geram pada proses konvensional yang lain. Pada proses pemesian gerinda permukaan, masing-masing butiran abrasif dari batu gerinda bertindak seperti miniatur pahat potong. Geometri dan orientasi dari butiran abrasif ini bersifat acak dan ketika proses gerinda permukaan berlangsung tidak semua butiran abrasif memotong benda kerja. Ada tiga tipe aksi dari butiran abrasif pada saat proses pemotongan, yaitu *cutting*,

ploughing dan *rubbing* (Rowe, 2009). *Cutting* adalah kondisi dimana butiran abrasif cukup panjang untuk menyentuh benda sehingga memungkinkan proses pemotongan terjadi. *Ploughing* adalah kondisi dimana butiran abrasif menyentuh benda kerja tetapi tidak cukup panjang. *Rubbing* adalah kondisi dimana butiran abrasif menyentuh permukaan benda kerja tetapi pada permukaan benda kerja tidak terjadi deformasi maupun pemotongan. Pada kondisi ini butiran abrasif dan permukaan benda kerja hanya bergesekan. Ilustrasi ketiga kondisi tersebut ditunjukkan pada Gambar 2.3.



Gambar 2.3 Tiga tipe aksi dari butiran abrasif: (a) *Cutting* (b) *Ploughing* (c) *Rubbing* (Rowe, 2009)

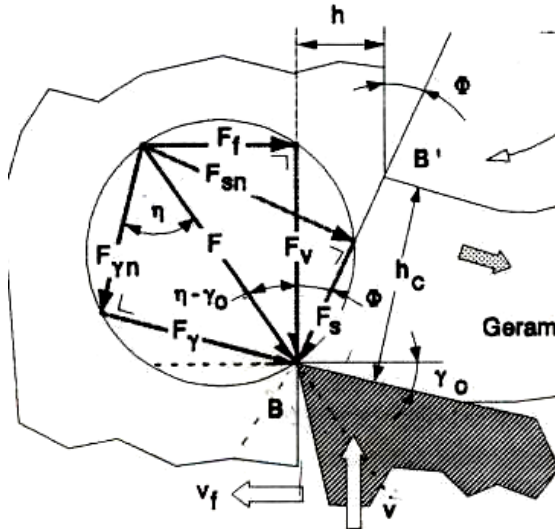
Pada saat kondisi *cutting* pada proses gerinda permukaan terjadi, permukaan benda kerja mendapat tekanan yang akan menimbulkan konsentrasi tegangan di daerah sekitar titik penekanan mata potong pahat. Tegangan pada benda kerja tersebut mempunyai orientasi yang kompleks dan pada salah satu arah akan terjadi tegangan geser yang maksimum. Apabila tegangan geser ini melebihi

yield point benda kerja, maka akan terjadi deformasi plastis yang menggeser dan memutuskan benda kerja diujung pahat pada suatu bidang geser.

Sistem gaya pada proses gerinda permukaan mempunyai prinsip yang sama dengan pemesinan konvensional yang lain. Berdasarkan teori Merchant, sistem gaya dipandang hanya pada satu bidang, sehingga gaya total dapat diuraikan menjadi dua komponen gaya yang saling tegak lurus. Penguraian gaya dalam hal ini dapat dikemukakan dalam tiga cara, yaitu (Rochim, 1993):

1. Gaya total (F) yang jika ditinjau dari proses deformasi material dapat diuraikan menjadi dua komponen, yaitu:
 F_s : gaya geser yang mendeformasikan material pada suatu bidang geser sehingga melampaui batas elastis.
 F_{sn} : gaya normal pada bidang geser yang menyebabkan pahat tetap; menempel pada benda kerja.
2. Gaya total (F) dapat diketahui arah dan besarnya dengan menggunakan dinamometer. Komponen gaya yang diukur adalah:
 F_v : gaya potong, searah dengan kecepatan potong.
 F_f : gaya makan, searah dengan kecepatan makan.
3. Gaya total (F) yang bereaksi pada bidang geram dan dapat diuraikan menjadi dua komponen, yaitu:
 F_y : gaya gesek pada bidang geram.
 F_{yn} : gaya normal pada bidang geram.

Karena berasal dari satu gaya, yaitu gaya total (F), maka Merchant membuat suatu ilustrasi dimana gaya-gaya tersebut digambarkan pada suatu lingkaran dengan diameter yang sama dengan gaya total. Gambar 2.4 menunjukkan lingkaran gaya pemotongan pada sudut geram positif.



Gambar 2.4 Lingkaran Merchant gaya pemotongan (Rochim, 1993)

Berdasarkan analisa geometrik dari lingkaran gaya (Merchant) dapat diturunkan rumus dasar gaya potong F_v (Rochim, 1993).

Dari, $F_v = F \cos (\eta - \gamma_o)$ dan $F_s = F \cos (\Phi + \eta - \gamma_o)$,

maka,

$$F_v = \frac{F_s \cos(\eta - \gamma_o)}{\cos(\Phi + \eta - \gamma_o)}$$

Gaya geser F_s dapat digantikan dengan penampang bidang geser dan tegangan geser yang terjadi padanya yaitu,

$$F_s = A_{shi} \cdot \tau_{shi} \quad ; \text{ N.}$$

dimana, τ_{shi} : tegangan geser pada bidang geser; N/mm^2 ,
 A_{shi} : penampang bidang geser,
 : $A / \sin \Phi$; mm^2 ,
 A : penampang geram sebelum terpotong,
 : $b \cdot h$; mm^2 .

Dengan demikian rumus gaya potong adalah,

$$F_v = \tau_{shi} \, b \cdot h \frac{\cos(\eta - \gamma_o)}{\sin \Phi \cos(\Phi + \eta - \gamma_o)} \quad \dots\dots\dots (2.2)$$

Hampir seluruh energi pemotongan diubah menjadi panas melalui proses gesekan, antara geram dengan pahat dan antara pahat dengan benda kerja, serta proses perusakan molekular atau ikatan atom pada bidang geser. Kerja/energi mekanik dalam proses pemotongan yang bebas getaran seluruhnya diubah menjadi energi panas/kalor. Energi mekanik persatuan waktu atau daya mekanik yang diubah menjadi energi panas persatuan mekanik waktu tersebut dapat dituliskan sebagai berikut (Rochim, 1993):

$$Q = Q_{sh} + Q_\gamma + Q_\alpha \quad ; \text{ W} \dots\dots\dots (2.3)$$

dimana, Q = Panas total yang dihasilkan perdetik,

$$= \frac{F_v \cdot v}{60} \quad ; \text{ J/s atau W}$$

$$Q_{sh} = \text{Panas yang dihasilkan perdetik pada bidang geser,}$$

$$= \frac{F_s \cdot v_s}{60} ; \text{ J/s atau W}$$

$$Q_\gamma = \text{Panas yang dihasilkan perdetik pada bidang geram,}$$

$$= \frac{F_\gamma \cdot v_c}{60} ; \text{ J/s atau W}$$

$$Q_a = \text{Panas yang dihasilkan perdetik pada bidang utama.}$$

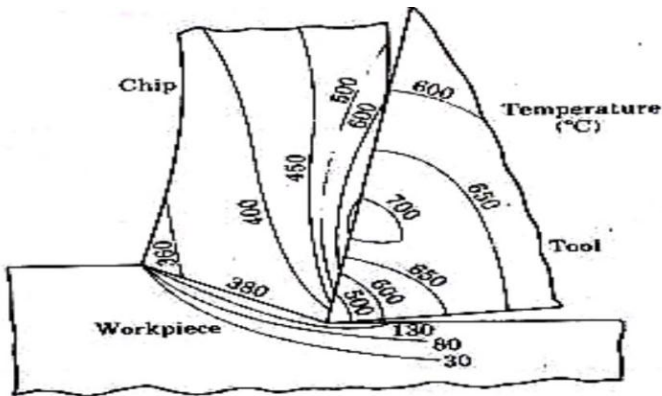
Panas tersebut sebagian akan terbawa oleh geram, sebagian mengalir menuju ke pahat dan benda kerja dengan prosentase sebagai berikut :

$$Q = Q_c + Q_s + Q_w ; \text{ W (2.4)}$$

dimana,

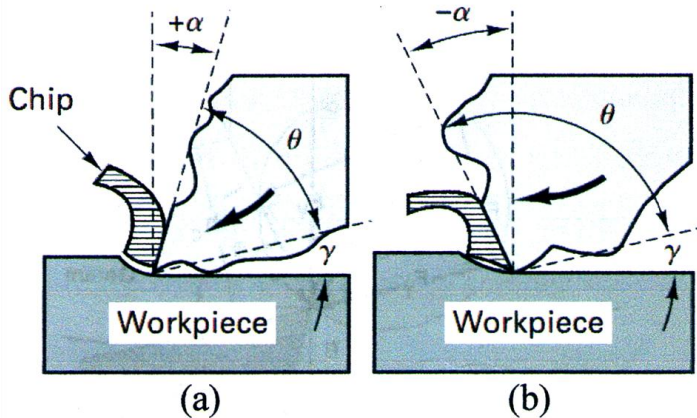
- Q_c = panas yang terbawa oleh geram dengan prosentase sekitar 75%,
- Q_s = panas yang merambat melalui pahat dengan prosentase sekitar 20%, dan
- Q_w = panas yang merambat melalui benda kerja dengan prosentase sekitar 5%.

Temperatur rata-rata yang terjadi pada saat pemotongan benda kerja dapat dilihat pada Gambar 2.5.



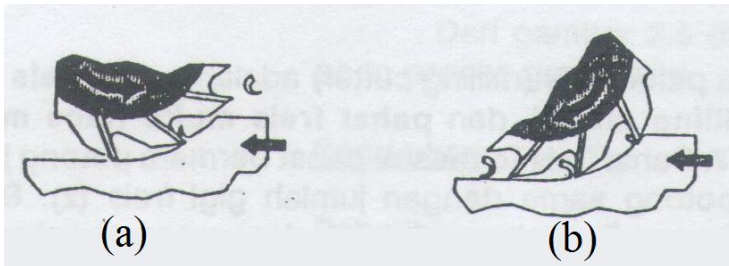
Gambar 2.5 Garis-garis isoterm pada geram pada waktu pemotongan berlangsung (Rochim, 1993)

Temperatur yang terjadi pada pahat seperti yang terlihat pada Gambar 2.5 menunjukkan nilai yang lebih besar akibat akumulasi panas hasil perpindahan panas secara konduksi dari geram menuju pahat. Hal seperti ini tidak terjadi pada proses penggerindaan karena butiran abrasif pada permukaan batu gerinda masing-masing berfungsi sebagai pahat potong dan proses pemotongan yang terjadi tidak berlangsung secara terus-menerus seperti pada proses gurdi, frais, ataupun bubut. Temperatur yang terjadi pada butiran abrasif batu gerinda tidak sama dengan temperatur hasil pemotongan seperti diatas karena ada jeda waktu butiran abrasif bergesekan dengan geram hasil pemotongan. Sudut geram pada butiran abrasif batu gerinda bersifat acak dan tersebar diseluruh permukaan batu gerinda. Geometri pahat dengan sudut geram positif dan negatif ditunjukkan pada Gambar 2.6.



Gambar 2.6 Geometri pahat dengan sudut geram (a) positif dan (b) negatif (Black dan Kohser, 2008)

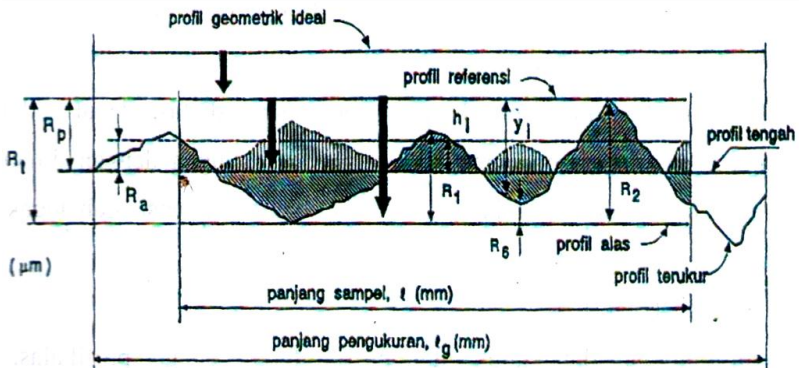
Berdasarkan arah penggerindaan proses gerinda bisa dibagi menjadi dua yaitu *up grinding* dan *down grinding*. *Down grinding* bisa menjaga ketajaman pahat dan mengurangi kemungkinannya kenaikan gaya seiring bertambahnya waktu selama proses gerinda. *Down grinding* juga bisa menghasilkan kekasaran permukaan yang lebih halus serta menjaga roda gerinda agar tidak cepat aus, sedangkan pada *up grinding* penyuplaian *cutting fluid* lebih efektif karena fluidanya langsung disuplaikan ke permukaan benda kerja (Rowe, 2010). Adapun ilustrasi dari *up grinding* dan *down grinding* yang ditunjukkan oleh Gambar 2.7.



Gambar 2.7 Ilustrasi proses gerinda (a) *up grinding* (b) *down grinding* (Rochim, 1993)

2.2.5 Kekasaran Permukaan Benda Kerja

Kekasaran permukaan didefinisikan sebagai ketidakteraturan konfigurasi permukaan pada suatu benda atau bidang. Hal ini terjadi karena terjadinya berbagai penyimpangan selama proses pemesinan, sehingga permukaan yang mempunyai bentuk sempurna tidak dapat dibuat. Posisi R_a , bentuk profil, panjang sampel dan panjang pengukuran yang dibaca oleh alat ukur kekasaran permukaan dapat dilihat pada Gambar 2.8 (Rochim, 2001).



Gambar 2.8 Parameter dalam profil permukaan (Rochim, 2001)

Keterangan Gambar 2.7 adalah sebagai berikut:

- a. Profil Geometris Ideal (*Geometrically Ideal Profile*)
 Profil ini merupakan profil dari geometris permukaan yang ideal yang tidak mungkin diperoleh karena banyaknya faktor yang mempengaruhi dalam proses pembuatannya. Bentuk dari profil geometris ideal ini dapat berupa garis lurus, lingkaran dan garis lengkung.
- b. Profil Referensi/Acuan/Puncak (*Reference Profile*)
 Profil ini digunakan sebagai acuan untuk menganalisis ketidakteraturan konfigurasi permukaan. Profil ini dapat berupa garis lurus atau garis dengan bentuk sesuai dengan profil geometrik ideal, serta menyinggung puncak tertinggi profil terukur dalam suatu panjang sampel.
- c. Profil Terukur (*Measured Profile*)
 Profil terukur adalah profil dari suatu permukaan terukur.
- d. Profil Alas (*Root Profile*)
 Profil alas adalah profil referensi yang digeserkan ke bawah (arah tegak lurus terhadap profil geometrik ideal pada suatu panjang sampel) sehingga menyinggung pada titik paling terendah profil terukur.
- e. Profil Tengah (*Center Profile*)
 Profil tengah merupakan profil referensi yang digeserkan ke bawah (arah tegak lurus terhadap profil geometrik ideal pada suatu panjang sampel) sedemikian rupa sehingga jumlah luas bagi daerah-daerah diatas profil tengah sampai profil terukur sama dengan jumlah luas daerah-daerah di bawah profil tengah sampai profil terukur.

Berdasarkan profil-profil yang telah dijelaskan, dapat didefinisikan beberapa parameter permukaan, yaitu yang berhubungan dengan dimensi pada arah tegak dan arah memanjang/mendatar. Untuk dimensi arah tegak dikenal beberapa parameter, yaitu (Rochim, 2001):

- a. Kekasaran Total (R_t)
Kekasaran total adalah jarak antara profil referensi dengan profil alas.
- b. Kekasaran Perataan (R_p)
Kekasaran perataan adalah jarak rata-rata antara profil referensi dengan profil terukur.

$$R_p = \frac{1}{l} \int_0^l y_i dx \dots\dots\dots (2.5)$$

- c. Kekasaran Rata-rata Aritmatik (R_a)
Kekasaran rata-rata aritmatik adalah harga rata-rata jarak antara profil terukur dengan profil tengah. Secara umum R_a dirumuskan:

$$R_a = \frac{1}{l} \int_0^l |h_i| dx \dots\dots\dots (2.6)$$

Harga R_a tersebut dapat didekati oleh persamaan:

$$R_a = \frac{1}{l} \sum_{i=1}^n |h_i| \dots\dots\dots (2.7)$$

$$R_a = \frac{h_1+h_2+h_3+\dots+h_n}{l} \dots\dots\dots (2.8)$$

Dengan:

- R_a : nilai kekasaran aritmatika.
- h_n : tinggi atau dalam bagian-bagian profil hasil pengukuran jarum peraba.
- n : frekuensi pengukuran
- l : panjang sampel yang telah ditentukan.

Dari bermacam-macam parameter permukaan yang telah disebutkan, parameter R_a relatif lebih banyak digunakan untuk mengidentifikasi permukaan. Hal ini disebabkan harga R_a lebih sensitif terhadap perubahan/penyimpangan yang terjadi pada proses pemesinan. Dengan demikian, jika ada tanda-tanda kenaikan kekasaran maka pencegahan dapat cepat dilakukan.

ISO telah mengklasifikasikan nilai kekasaran rata-rata aritmatik (R_a) menjadi 12 tingkat kekasaran seperti yang ditunjukkan pada Tabel 2.1. Angka kekasaran permukaan ini digunakan untuk menghindari kemungkinan terjadinya kesalahan dalam menginterpretasikan suatu harga kekasaran permukaan. Dengan adanya satuan harga ini, kekasaran permukaan dapat dituliskan langsung dengan menyatakan harga R_a atau dengan menggunakan tingkat kekasaran ISO (Rochim, 2001).

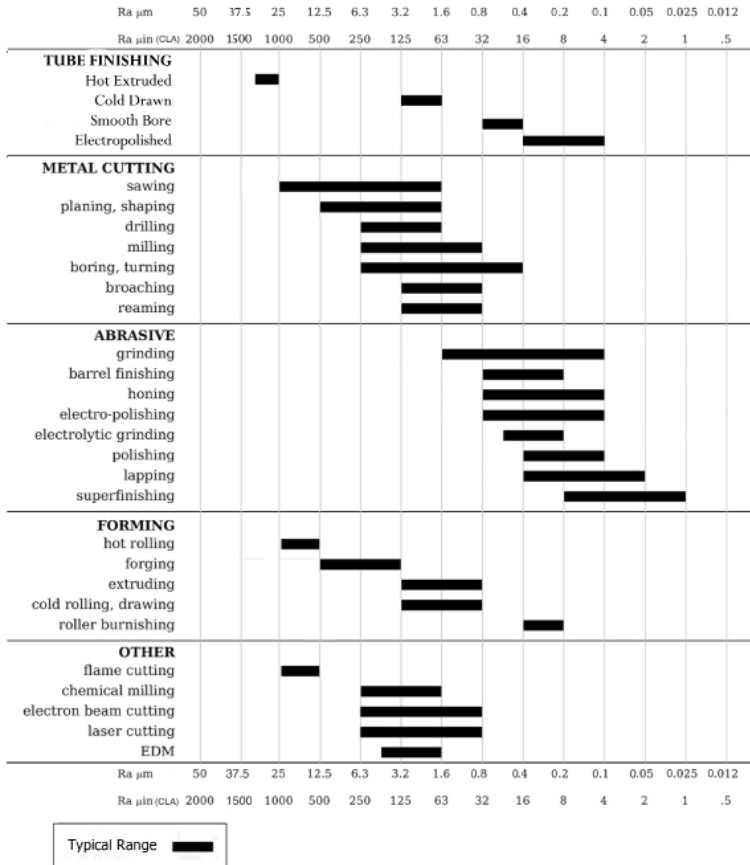
Tabel 2.1 Angka kekasaran dan panjang sampel standar

R_a (μm)	Angka kelas kekasaran	Panjang sampel (mm)	Keterangan
50 25	N12 N11	8	Sangat Kasar
12.5 6.3	N10 N9	2.5	Kasar
3.2 1.6	N8 N7	0.8	Normal
0.2 0.1	N4 N3	0.25	Halus
0.025	N1	0.08	Sangat Halus

Sumber: Rochim, 2001

Beberapa nilai contoh kekasaran yang dapat dicapai oleh beberapa cara pengerjaan ditunjukkan pada Tabel 2.2.

Tabel 2.2 Nilai kekasaran yang dicapai oleh beberapa pengerjaan



Sumber: www.finetubes.co.uk

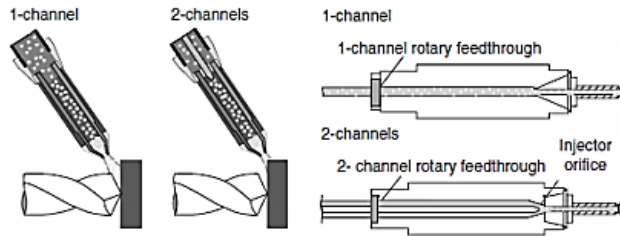
2.2.6 Surface Burning

Surface burning merupakan salah satu kerusakan termal yang terjadi selama proses gerinda permukaan. Hal

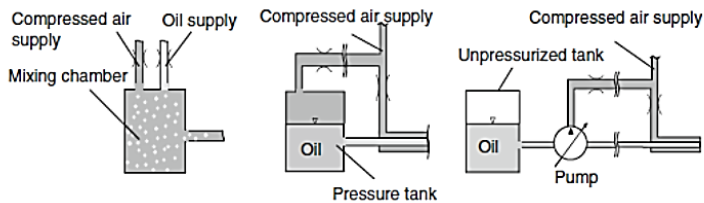
ini terjadi pada area gesekan antara batu gerinda dengan permukaan benda kerja dimana pada area ini temperatur naik sangat tinggi. *Surface burning* ditandai dengan perubahan warna dari permukaan benda kerja hasil proses gerinda. Secara visual perubahan warna yang terjadi adalah warna biru kemerah-merahan. Perubahan warna yang terjadi ini seringkali terjadi tanpa disertai adanya kerusakan secara metalurgi. Tetapi hal ini merupakan indikator bahwa kerusakan termal telah terjadi dan jika tidak dikendalikan dengan benar maka akan terjadi kerusakan permukaan yang lebih lanjut. *Surface burning* disebabkan karena lapisan permukaan yang tipis pada benda teroksidasi dan juga metode pendinginan yang kurang tepat. Selain itu, komposisi kimia, perlakuan panas dan bentuk dari material juga berpengaruh terhadap fenomena *surface burning*.

2.2.7 *Minimum Quantity Lubrication (MQL)*

MQL dapat didefinisikan sebagai penyuplaian *cutting fluid* pendingin dalam bentuk aerosol (Klocke, 2011). MQL adalah teknologi terkini pada proses pemesinan untuk mendapatkan keunggulan dalam keselamatan, lingkungan dan ekonomi dengan mengurangi penggunaan *cutting fluid* pada proses pemesinan. *Cutting fluid* dialirkan dengan jumlah yang sangat kecil (< 30 ml/h) pada aliran udara bertekanan (Braga dkk., 2001). *Cutting fluid* yang digunakan pada MQL utamanya adalah *fatty alcohol* dan *ester oil* atau minyak nabati yang dimodifikasi secara kimiawi (Klocke, 2011). Metode penyuplaian *cutting fluid* pada MQL ada dua, yaitu *external MQL supply* dan *internal MQL supply*, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.9. Sistem suplai MQL ditunjukkan pada Gambar 2.10.



Gambar 2.9 *External MQL supply* dan *Internal MQL supply* (Klocke, 2011)



Gambar 2.10 Sistem suplai MQL (Klocke, 2011)

2.2.8 Langkah-Langkah dalam Desain Eksperimen

Desain eksperimen memerlukan tahap-tahap penting yang berguna agar eksperimen mengarah pada hasil yang diinginkan. Berikut adalah langkah-langkah melakukan desain eksperimen (Iriawan dan Astuti, 2006):

1. Mengenali Permasalahan

Tahap awal desain eksperimen dimulai dengan melakukan identifikasi permasalahan sehingga kita dapat memperoleh suatu kesimpulan yang dapat menjawab segala permasalahan. Dari permasalahan yang ada kemudian dibuat suatu pernyataan yang tepat mewakili permasalahan agar memperoleh penyelesaian yang tepat.

2. Memilih Variabel Respon

Tahap kedua adalah menetapkan variabel respon. Variabel respon merupakan variabel dependen, yaitu variabel yang dipengaruhi oleh level faktor.

3. Menentukan Faktor dan Level

Peneliti harus menentukan cara mengendalikan faktor dan cara mengukurnya. Tahap ini memerlukan pengetahuan yang lebih mengenai permasalahan yang akan diteliti agar faktor dan level yang ditentukan tidak menyimpang jauh dari hasil yang diinginkan.

4. Memilih Metode Desain Eksperimen

Metode desain eksperimen harus disesuaikan dengan tujuan penelitian dan permasalahan yang ada. Beberapa metode desain eksperimen antara lain desain faktorial, desain taguchi, dan permukaan respon.

5. Melaksanakan Percobaan

Saat eksperimen dilakukan, proses harus diamati dengan cermat agar eksperimen berjalan sesuai dengan yang direncanakan.

6. Menganalisis Data

Analisis data pada desain eksperimen dilakukan sesuai dengan metode yang dibuat. Salah satu tahap dalam analisis data eksperimen adalah melakukan analisis residual dan uji kecukupan model. Analisis data dalam desain eksperimen digunakan sebagai dasar membuat suatu keputusan dan pernyataan yang tepat.

7. Membuat Suatu Keputusan

Setelah analisis data dilakukan, langkah terakhir adalah membuat suatu keputusan berdasarkan eksperimen yang telah dilakukan.

2.2.9 Desain Faktorial

Desain faktorial merupakan percobaan yang terdiri dari 2 faktor atau lebih yang masing-masing faktor mempunyai level-level tertentu. Semua kemungkinan kombinasi pada tiap-tiap level dari semua faktor, diambil pada setiap unit percobaan. Pelaksanaan percobaan faktorial harus dilakukan secara acak untuk mengurangi bias pada hasil percobaan yang diperoleh. Percobaan yang didasarkan pada desain faktorial, memungkinkan peneliti untuk mempelajari pengaruh setiap faktor terhadap variabel respon, serta efek dari interaksi antara faktor-faktor pada variabel respon (Bhattacharyya dan Johnson, 1977). Percobaan desain faktorial dengan tiga faktor A, B dan C yang masing masing mempunyai 2, 3 dan 3 level ditunjukkan pada Tabel 2.3.

Tabel 2.3 Rancangan penelitian desain faktorial

Faktor			Respon	
A	B	C	Replikasi 1	Replikasi 2
Level 1	Level 1	Level 1	Y_{1111}	Y_{1112}
		Level 2	Y_{1121}	Y_{1122}
		Level 3	Y_{1131}	Y_{1132}
	Level 2	Level 1	Y_{1211}	Y_{1212}
		Level 2	Y_{1221}	Y_{1222}
		Level 3	Y_{1231}	Y_{1232}
	Level 3	Level 1	Y_{1311}	Y_{1312}
		Level 2	Y_{1321}	Y_{1322}
		Level 3	Y_{1331}	Y_{1332}
Level 2	Level 1	Level 1	Y_{2111}	Y_{2112}
		Level 2	Y_{2121}	Y_{2122}
		Level 3	Y_{2131}	Y_{2132}
	Level 2	Level 1	Y_{2211}	Y_{2212}
		Level 2	Y_{2221}	Y_{2222}
		Level 3	Y_{2231}	Y_{2232}
	Level 3	Level 1	Y_{2311}	Y_{2312}
		Level 2	Y_{2321}	Y_{2322}
		Level 3	Y_{2331}	Y_{2332}

2.2.10 Analisis Variansi (ANAVA)

Analisis variansi adalah teknik yang digunakan untuk menganalisa data yang telah disusun dalam desain secara statistik. Analisis ini dilakukan dengan menguraikan seluruh variansi atas bagian-bagian yang diteliti. Pada tahap ini, akan dilakukan pengklasifikasian hasil eksperimen secara statistik sesuai dengan sumber variansi sehingga dapat mengidentifikasi kontribusi variabel proses. Dengan demikian akurasi perkiraan model dapat ditentukan. Analisis

variansi pada faktorial yang dilakukan berdasarkan perhitungan jumlah kuadrat untuk masing-masing kolom. Analisis variansi yang digunakan untuk menganalisis data percobaan yang terdiri dari dua variabel proses atau lebih dengan dua level atau lebih. Tabel ANAVA terdiri dari perhitungan derajat kebebasan (*degrees of freedom*, df), jumlah kuadrat (*sum of squares*, SS), kuadrat tengah (*mean squares*, MS) dan F hitung (F_0) seperti yang ditunjukkan pada Tabel 2.4 (Ross, 2008).

Tabel 2.4 Tabel analisis variansi (ANAVA) dua arah

Sumber variasi	Sum of square (SS)	Degrees of freedom (df)	Mean square (MS)	$F_{\text{Ratio}} (F_0)$
Variabel Proses A	$SS_A = n_A \sum_{i=1}^n (A_i - \bar{y})^2$	$d_A - 1$	$MS_A = \frac{SS_A}{df_A}$	$\frac{MS_A}{MS_E}$
Variabel Proses B	$SS_B = n_B \sum_{i=1}^n (B_i - \bar{y})^2$	$d_B - 1$	$MS_B = \frac{SS_B}{df_B}$	$\frac{MS_B}{MS_E}$
Interaksi AB	$SS_{AB} = \sum_i \sum_j \frac{X_{ij}^2}{n_A} - \frac{T^2}{n_{AB}}$	$(a-1)(b-1)$	$MS_{AB} = \frac{SS_{AB}}{(a-1)(b-1)}$	$\frac{MS_{AB}}{MS_E}$
Error	$SSE = SS_T - SS_A - SS_B$	$ab(n-1)$	$MS_E = \frac{SS_E}{df_E}$	
Total	$SS_T = \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2$	$n - 1$		

Sumber: Ross, 2008

Keterangan:

- d_A = banyaknya level pada variabel proses A,
 d_B = banyaknya level pada variabel proses B,
 n_A = banyaknya replikasi level variabel proses A,
 n_B = banyaknya replikasi level variabel proses B,
 \bar{y} = rata-rata total
 n = jumlah pengamatan

2.2.11 Uji Distribusi F

Pengujian uji distribusi F dilakukan dengan cara membandingkan variansi yang disebabkan oleh masing-masing faktor dan *error*. Variansi *error* adalah variansi dari setiap individu dalam pengamatan yang timbul karena faktor-faktor yang tidak dapat dikendalikan (Soejanto, 2009). Secara umum, hipotesis yang digunakan dalam pengujian ini untuk faktor yang tidak diambil secara random (*fixed*) adalah:

- H_0 : $\mu_1 = \mu_2 = \mu_3 = \dots = \mu_k$
 H_1 : sedikitnya ada satu pasang μ yang tidak sama

Kegagalan menolak H_0 mengindikasikan tidak adanya perbedaan rata-rata dari nilai respon yang dihasilkan pada perlakuan yang berbeda, sedangkan penolakan H_0 mengindikasikan adanya perbedaan rata-rata dari nilai respon tersebut. Selain itu, respon pada setiap eksperimen dapat dimodelkan dalam bentuk (Montgomery, 1991):

$$Y_{ijk} = \mu + \alpha_i + \beta_j + \tau_k + \varepsilon_{ijkm},$$

Dengan demikian, hipotesis yang juga dapat digunakan dalam pengujian ini adalah:

$$\begin{aligned}
 \text{Untuk taraf faktor A} \rightarrow H_0 &: \alpha_1 = \alpha_2 = \alpha_3 = \dots = \tau_i = 0 \\
 &H_1 : \text{paling sedikit ada satu } \alpha_i \neq 0 \\
 \text{Untuk taraf faktor B} \rightarrow H_0 &: \beta_1 = \beta_2 = \beta_3 = \dots = \beta_j = 0 \\
 &H_1 : \text{paling sedikit ada satu } \beta_j \neq 0 \\
 \text{Untuk taraf faktor C} \rightarrow H_0 &: \tau_1 = \tau_2 = \tau_3 = \dots = \tau_k = 0 \\
 &H_1 : \text{paling sedikit ada satu } \tau_k \neq 0
 \end{aligned}$$

Kegagalan menolak H_0 mengindikasikan tidak adanya pengaruh faktor A dan faktor B terhadap respon serta tidak ada interaksi antara faktor A dengan faktor B, sedangkan penolakan H_0 mengindikasikan adanya pengaruh faktor A dan faktor B terhadap respon serta adanya interaksi antara faktor A dengan faktor B. kegagalan menolak atau penolakan H_0 berdasarkan pada nilai F_{hitung} yang dirumuskan:

$$\text{Untuk taraf faktor A} \rightarrow F_{hitung} < \frac{MS_A}{MS_E}$$

$$\text{Untuk taraf faktor A} \rightarrow F_{hitung} < \frac{MS_B}{MS_E}$$

Kegagalan menolak H_0 pada masing-masing kasus dilakukan jika mengalami kondisi sebagai berikut:

$$\text{Untuk taraf faktor A} \rightarrow F_{hitung} < F_{\alpha, v_A, v_E}$$

$$\text{Untuk taraf faktor B} \rightarrow F_{hitung} < F_{\alpha, v_B, v_E}$$

Bila menggunakan perangkat lunak statistik, kegagalan menolak H_0 dilakukan jika P_{value} lebih besar dari pada α (taraf signifikansi). Kegagalan menolak H_0 bisa juga dilakukan apabila nilai $F_{hitung} < F_{tabel}$ (Park, 1996).

2.2.12 Analisis Regresi

Untuk mengetahui hubungan antara variabel proses dan variabel respon biasanya dibuat model regresi. Untuk memilih model yang paling sesuai biasanya diperiksa apakah model antar variabel adalah model linier (model orde satu) atau model polinomial. Apabila dalam sistem terdapat pola tidak linier, maka model yang tepat adalah model polinomial orde tinggi. Secara umum bentuk persamaan regresi orde pertama dinyatakan sebagai berikut.

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \dots + \beta_k X_k + \varepsilon \dots\dots\dots (2.9)$$

dengan: Y = Variabel respon

β_0 = Intersep

β_i = Koefisien parameter model

X_i = Nilai koding variabel bebas

ε = Residual dengan asumsi IIDN $(0, \sigma^2)$

Untuk taksiran orde pertama adalah :

$$\hat{Y} = b_0 + \sum_{i=1}^k b_i X_i \dots\dots\dots (2.10)$$

dengan: \hat{Y} = Nilai taksiran

b_0 = Konstanta

b_i = Taksiran parameter

X_i = Variabel bebas

Persamaan untuk model orde kedua ditunjukkan oleh persamaan berikut:

$$Y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i X_i + \sum_{i=1}^k \beta_{ii} X_i^2 + \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^k \beta_{ij} X_i X_j + \varepsilon \dots (2.11)$$

Pendugaan untuk model orde kedua dinyatakan dalam persamaan berikut:

$$\hat{Y} = b_0 + \sum_{i=1}^k b_i X_i + \sum_{i=1}^k b_{ii} X_i^2 + \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^k b_{ij} X_i X_j \dots\dots (2.12)$$

Jika $k = 4$ penduga untuk model orde kedua menjadi

$$\begin{aligned} \hat{Y} = & b_0 + b_1 X_1 + b_2 X_2 + b_3 X_3 + b_4 X_4 + b_{11} X_1^2 + b_{22} X_2^2 + \\ & b_{33} X_3^2 + b_{44} X_4^2 + b_{12} X_1 X_2 + b_{13} X_1 X_3 + b_{14} X_1 X_4 + \\ & b_{23} X_2 X_3 + b_{24} X_2 X_4 + b_{34} X_3 X_4 \dots\dots\dots (2.13) \end{aligned}$$

Untuk dapat mengestimasi kontribusi pengaruh dari setiap faktor pada respon sehingga akurasi model yang digunakan dapat ditentukan dapat digunakan analisa varians (ANOVA) yang merupakan teknik perhitungan secara kuantitatif. Beberapa pengujian model statistik yang lazim digunakan adalah sebagai berikut:

a. Pengujian Kesesuaian Model

Pengujian model pada penelitian ini menggunakan pengujian koefisien determinasi (R^2). Koefisien determinasi (R^2) adalah suatu nilai statistik yang dapat digunakan untuk mengetahui apakah ada hubungan pengaruh antara dua variabel (variabel X dan Y). Nilai koefisien determinasi menunjukkan prosentase total variasi nilai variabel dependen (Y) yang dapat dijelaskan oleh persamaan regresi yang dihasilkan. Koefisien determinasi nilainya terletak antara $0 < R^2 < 1$. Semakin besar nilai R^2 , maka semakin besar pula pengaruh semua variabel X terhadap variabel Y. Misalnya R^2 dari hasil perhitungan adalah 0,87 atau 87% maka berarti total

variasi nilai Y yang dapat dijelaskan oleh model persamaan regresi adalah 87% dan sisanya yaitu 13% adalah variasi nilai variabel Y yang dipengaruhi oleh variabel lain yang berada diluar model.

b. Pengujian Koefisien Regresi

Pengujian koefisien regresi dapat dilakukan secara serentak dan individu.

Pengujian Koefisien Regresi Secara Individu

Pengujian parameter secara individu digunakan untuk mengetahui seberapa besar sumbangan tiap-tiap parameter variabel bebas terhadap terjadinya perubahan pada variabel respon Y dalam model. Hipotesisnya adalah:

$$H_0 : \beta_i = 0$$

$$H_1 : \beta_i \neq 0$$

Statistik uji : $t = \frac{b_i}{s(b_i)}$ dengan b_i adalah taksiran β_i sedangkan $s(b_i)$ dirumuskan dengan:

$$s(b_i) = \sqrt{\frac{\hat{\sigma}^2}{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2}} \dots\dots\dots (2.14)$$

Penolakan hipotesis dilakukan jika $|t_{hit}| > t_{n-k-1; \alpha/2}$.

Pengujian Koefisien Regresi Secara Serentak

Hipotesis yang digunakan dalam pengujian parameter regresi secara serentak adalah sebagai berikut:

$$H_0 : \beta_1 = \beta_2 = \dots = \beta_k = 0$$

H_1 : minimal ada satu yang tidak sama dengan nol; $j = 1, 2, \dots, k$

Statistik uji yang digunakan:

$$F_{hitung} = MS_R / MS_E = \frac{SS_R / k}{SS_E / (N - 1 - k)} \dots\dots\dots (2.15)$$

Daerah penolakan yaitu tolak H_0 pada tingkat signifikansi α apabila $F_{hitung} > F_{(\alpha; k, n-1-k)}$, yang berarti secara statistik variabel-variabel X memberikan sumbangan yang cukup berarti dalam model.

2.2.13 Uji Asumsi Residual

Residual didefinisikan sebagai selisih antara pengamatan dan nilai dugaannya $e_i = Y_i - \hat{Y}_i$. Dalam analisis regresi terdapat asumsi bahwa residual bersifat bebas satu sama lain (independen), mempunyai rata-rata sama dengan nol dan variansi yang konstan σ^2 (identik), serta berdistribusi normal. Oleh karena itu dalam setiap pendugaan model harus dilakukan pemeriksaan asumsi tersebut apakah terpenuhi atau tidak.

1. Uji independen

Uji independen digunakan untuk menjamin bahwa pengamatan telah dilakukan secara acak, yang berarti antar pengamatan tidak ada korelasi (independen). Pemeriksaan asumsi ini dilakukan dengan menggunakan *plot auto correlation function* (ACF).

2. Uji identik

Uji identik bertujuan untuk memenuhi apakah residual mempunyai penyebaran yang sama. Hal ini dilakukan dengan memeriksa plot e_i , terhadap \hat{Y}_i (secara visual). Jika penyebaran datanya acak dan tidak menunjukkan pola-pola tertentu, maka asumsi identik terpenuhi.

3. Uji kenormalan

Normal probability plot pada *software* Minitab menyatakan probabilitas dari residual suatu respon. Selain itu, dengan *Kolmogorov-Smirnov normality test* juga dapat digunakan dalam pengujian kenormalan residual. Hipotesis yang digunakan adalah:

H_0 : Residual berdistribusi normal

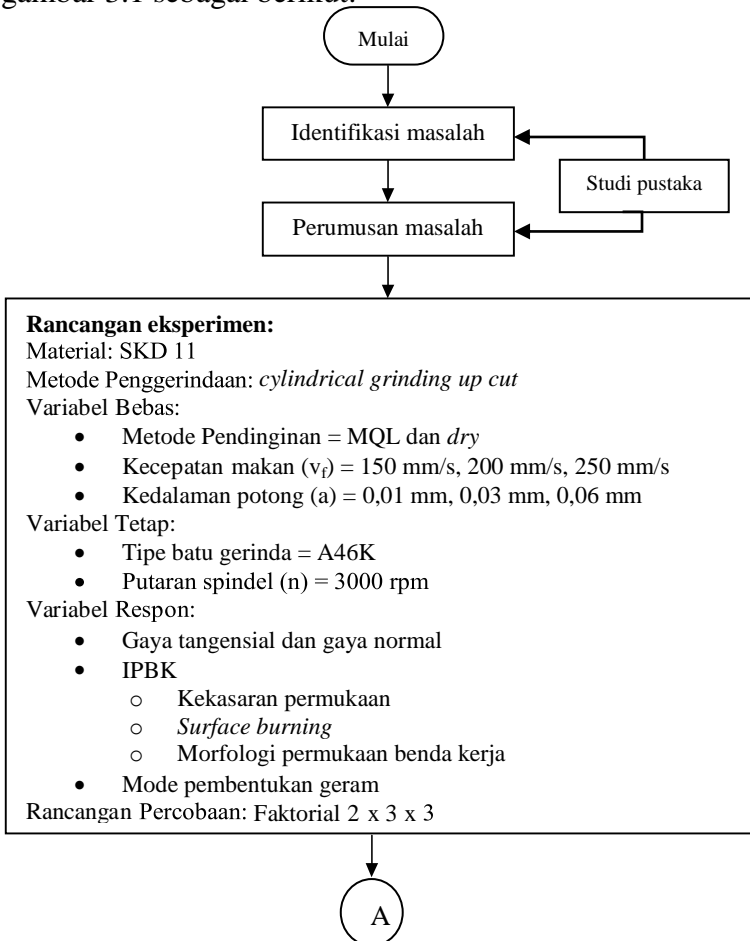
H_1 : Residual tidak berdistribusi normal

H_0 ditolak jika *p-value* lebih kecil dari pada $\alpha = 0,05$.

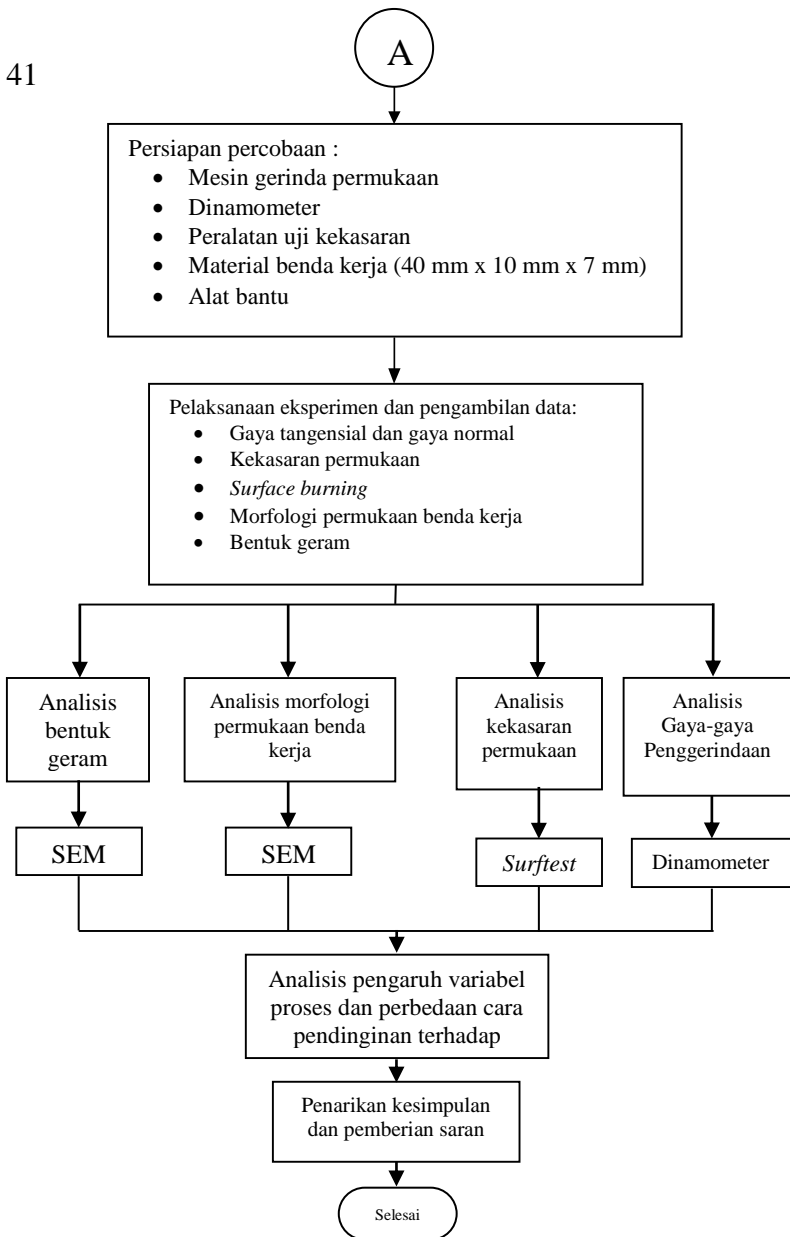
BAB 3 METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Tahapan Penelitian

Langkah-langkah penelitian yang dilakukan pada penelitian ini mengikuti diagram alir yang ditunjukkan oleh gambar 3.1 sebagai berikut:



Gambar 3.1 Diagram alir metode penelitian



Gambar 3.1 Diagram alir metodologi penelitian
(lanjutan)

3.2 Variabel Penelitian

Data yang dipergunakan dalam penelitian ini merupakan data primer yang diperoleh dari hasil eksperimen. Variabel-variabel yang digunakan dalam penelitian ini adalah:

3.2.1 Variabel Bebas

Variabel bebas merupakan variabel proses yang dapat dikendalikan dan besarnya dapat ditentukan, berdasarkan pertimbangan tertentu dan tujuan dari penelitian itu sendiri. Pada penelitian ini yang menjadi variabel bebas adalah:

- a. Metode pendinginan = MQL dan *Dry*
- b. Kecepatan makan (v_f) = 150 mm/s, 200 mm/s, 250 mm/s
- c. Kedalaman potong (a) = 0,01 mm, 0,03 mm, 0,06 mm

3.2.2 Variabel Respon

Variabel tak bebas atau variabel respon merupakan variabel yang besarnya tidak dapat ditentukan, dan nilainya dipengaruhi oleh perlakuan yang diberikan, serta hasilnya diketahui setelah melaksanakan percobaan. Variabel respon pada penelitian ini adalah:

- a. Gaya tangensial dan gaya normal (N)
Pengambilan data gaya tangensial (F_y) dan gaya normal (F_z) dilakukan dengan menggunakan dinamometer yang dipasang pada mesin gerinda permukaan.
- b. Integritas permukaan benda kerja (IPBK)
IPBK yang analisa meliputi kekasaran permukaan benda kerja, *surface burning* dan morfologi permukaan benda kerja.

c. Mode pembentukan geram

Mengamati bentuk-bentuk geram seperti *lamellar*, *leafy*, *irregular* dan *spherical* dengan menggunakan SEM.

3.2.3 Variabel Konstan

Variabel konstan merupakan variabel proses yang tidak diteliti. Variabel ini dijaga agar tidak berubah selama proses eksperimen sehingga tidak mempengaruhi hasil eksperimen. Terdapat dua variabel konstan yang digunakan pada penelitian ini yaitu, jenis batu gerinda (A46K), dan putaran spindel sebesar 3000 rpm.

3.3 Alat dan Bahan Penelitian

Penelitian ini dilakukan untuk memperoleh data respon yang nilainya akan dipengaruhi oleh perlakuan yang diberikan. Penelitian dilakukan di Laboratorium Pemesinan Jurusan Teknik Mesin ITS Surabaya.

3.3.1 Alat Penelitian

Peralatan yang digunakan adalah :

1. Mesin Gerinda Permukaan

Mesin gerinda permukaan yang digunakan pada penelitian ini adalah mesin gerinda permukaan yang berada di Laboratorium Proses Manufaktur Jurusan Teknik Mesin ITS. Mesin gerinda permukaan ditunjukkan pada Gambar 3.2 dengan spesifikasi sebagai berikut:

Jenis mesin	: <i>Surface Grinding</i>
Model	: KGS818AH
Dimensi meja kerja	: Panjang 200 mm dan lebar 460 mm
Kecepatan putar	: 3000 rpm



Gambar 3.2 Mesin gerinda permukaan model KGS818AH

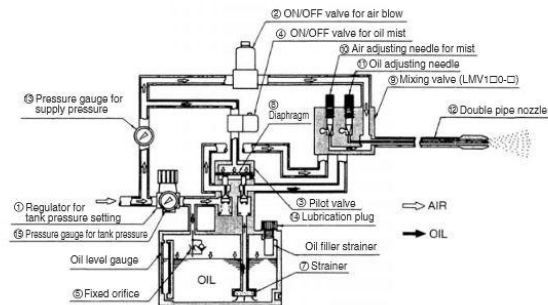
2. Unit MQL

Unit MQL yang digunakan adalah SMC *mist spray unit* LMU 100-15. Unit ini berfungsi sebagai penyalur *cutting fluid* dalam bentuk aerosol yang memiliki kapasitas tangki penyimpanan *cutting fluid* sebesar 3000 cm³ dan *inlet pressure* hingga 10 bar. Unit MQL ditunjukkan pada gambar 3.3 dan skema sistem kerja unit MQL ditunjukkan pada gambar 3.4. Spesifikasi unit MQL bisa dilihat pada Lampiran 1.



LMU100

Gambar 3.3 Unit MQL



Gambar 3.4 Skema sistem kerja unit MQL

3. Dinamometer

Dinamometer yang digunakan adalah dinamometer merek KISTLER tipe 9272. Dinamometer ini bertugas untuk pengukuran gaya tangensial dan gaya normal (F_y dan F_z) pada saat proses gerinda permukaan yang ditunjukkan pada Gambar 3.5.



Gambar 3.5 Dinamometer tipe 9272

4. *Data Acquisition System (DAQ)*

Data Acquisition System (DAQ) atau sistem akuisisi data digunakan sebagai penghubung dari *charge amplifier* dan dinamometer ke *notebook* yang mempunyai perangkat lunak *DynoWare*, sehingga data dapat ditampilkan pada *notebook*. DAQ yang dipakai dalam penelitian ini adalah KISTLER tipe 5697A, DAQ ditunjukkan pada Gambar 3.6 dan memiliki dimensi 208 mm x 70 mm x 249 mm serta massa seberat 2,15 kg.



Gambar 3.6 *Data Acquisition System (DAQ)*

5. *Charge amplifier type 5070A*

Charge amplifier digunakan untuk menampilkan hasil pengukuran gaya tangensial dan gaya normal yang terhubung dengan dinamometer. *Charge amplifier* ini ditunjukkan pada Gambar 3.7.



Gambar 3.7 *Charge amplifier type 5070A*

6. *Notebook*

Notebook digunakan untuk menampilkan dan mengolah data hasil percobaan. *Notebook* yang dipakai sudah memiliki perangkat lunak DynoWare dari KISTLER. Ilustrasi *notebook* ditunjukkan pada Gambar 3.8.



Gambar 3.8 *Notebook*

7. *Surface Roughness Tester*

Pengukuran angka kekasaran permukaan pada penelitian ini dilakukan dengan menggunakan Mitutoyo *Surftest* 301 yang memiliki kecermatan sebesar $0,01\mu\text{m}$. Mitutoyo *Surftest* 301 ditunjukkan oleh gambar 3.9.



Gambar 3.9 Mitutoyo *surftest* 301

8. *Scanning Electron Microscope (SEM)*

Pada penelitian ini digunakan alat SEM EVO MA10. Alat ini mampu mengamati partikel dengan pembesaran sampai 150.000 kali dengan resolusi kedalaman 3-100 nanometer, sehingga bentuk geram

dapat diamati dan dianalisis dengan alat ini. SEM EVO MA10 ditunjukkan pada Gambar 3.10



Gambar 3.10 *Scanning Electron Microscope* (SEM) EVO MA 10

9. Alat Bantu

Peralatan bantu yang digunakan pada penelitian kali ini adalah:

a. Mistar insut

Mistar insut digunakan untuk mengukur dimensi spesimen uji yang memiliki kecermatan 0,02 mm. Mistar insut ditunjukkan pada Gambar 3.11.



Gambar 3.11 Mistar insut

b. Meja rata

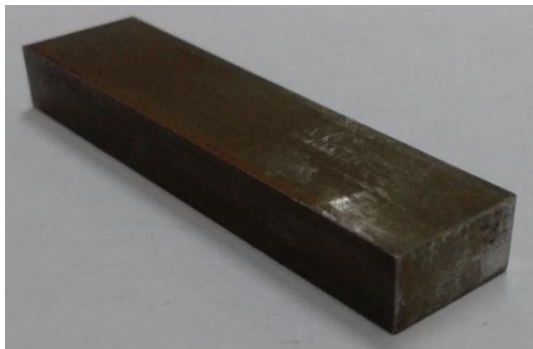
Meja rata digunakan untuk meletakkan spesimen uji pada saat melakukan pengukuran kekasaran permukaan. Hal ini dilakukan agar dapat memperoleh hasil pengukuran yang maksimal.

c. Alat bantu cekam benda kerja

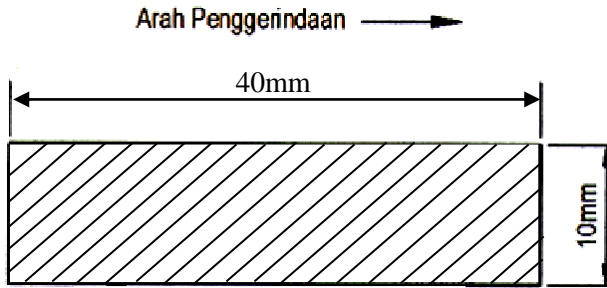
Dimensi benda kerja yang relatif kecil membuat benda kerja sulit untuk dicekam. Benda kerja harus dicekam dengan baik agar pada saat proses gerinda, pengukuran gaya dapat dilakukan dengan sebaik mungkin.

3.3.2 Bahan Penelitian

Material yang digunakan dalam penelitian ini adalah baja SKD 11 dengan dimensi 40 mm x 10 mm x 7 mm. Bentuk dan daerah penggerindaan dari spesimen benda kerja dapat dilihat pada Gambar 3.12 dan Gambar 3.13.



Gambar 3.12 Bentuk spesimen benda kerja



Gambar 3.13 Daerah penggerindaan

3.4 Prosedur Penelitian

Penelitian ini dilakukan dengan langkah-langkah sebagai berikut:

1. Penyiapan spesimen dengan dimensi 40 mm x 10 mm x 7 mm.
2. Penyeimbangan (*balancing*) dan pengasahan (*dressing*) batu gerinda.
3. Penyiapan alat untuk mengukur gaya tangensial dan gaya normal pada proses gerinda dengan langkah-langkah sebagai berikut:
 - a. Penyiapan *notebook* yang sudah terpasang perangkat lunak *DynoWare*.
 - b. Pemasangan kabel USB dan kabel power pada DAQ, serta kabel analog dan kabel power untuk *charge amplifier*.
 - c. Penghidupan DAQ dan *charge amplifier* selama 30 menit untuk *warming up*.
 - d. Pengaturan data sensitifitas pada DAQ sesuai dengan data kalibrasi berdasarkan sertifikat kalibrasi.
 - e. Pemasangan dinamometer pada meja mesin gerinda tanpa menggunakan elektromagnet.

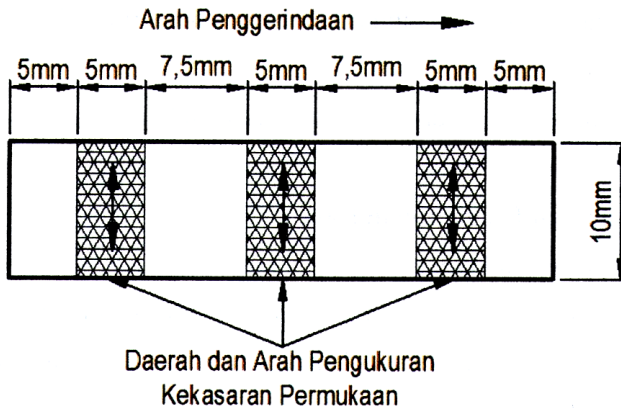
- f. Pemasangan alat bantu cekam pada dinamometer.
 - g. Pemasangan spesimen pada alat bantu yang sudah terpasang pada dinamometer.
4. Penyiapan alat MQL untuk pendinginan pada proses gerinda permukaan.
 5. Penghidupan mesin gerinda dan pengaturan variabel-variabel yang telah ditetapkan sesuai dengan kombinasi faktor yang telah ditentukan.
 6. Proses penggerindaan benda kerja menggunakan metode *cylindrical grinding up cut*.
 7. Pengambilan data untuk variabel tak bebas dilakukan setelah siklus ke-5 dari proses penggerindaan.
 8. Pengukuran gaya normal dan gaya tangensial (F_z & F_y) selama proses penggerindaan.
 9. Pelepasan dan pengeringan spesimen setelah proses selesai.
 10. Proses *dressing* dilakukan pada batu gerinda setiap kali penggantian spesimen.
 11. Pengukuran kekasaran permukaan dengan menggunakan *surface roughness tester* (Mitutoyo Surftest 310).
 12. Pengamatan *surface burning* yang terbentuk pada permukaan benda kerja hasil proses gerinda.
 13. Penyiapan SEM.
 14. Penempatan benda kerja hasil proses gerinda permukaan pada meja SEM.
 15. Pengamatan dan pengambilan gambar morfologi permukaan benda kerja dengan kombinasi variabel proses tertentu.
 16. Penempatan geram hasil proses gerinda permukaan pada meja SEM.

17. Pengamatan dan pengambilan gambar geram dengan kombinasi variabel proses tertentu.
18. Pelaksanaan analisis dari data yang sudah didapat.

3.5 Pengukuran dan Pengambilan Data

3.5.1 Pengukuran Kekasaran Permukaan

Permukaan benda kerja hasil proses gerinda diukur kekasarannya dengan arah tegak lurus terhadap arah penggerindaan benda kerja. Untuk setiap spesimen, pengukuran dilakukan sebanyak tiga kali pada posisi awal, tengah dan akhir proses penggerindaan. Gambar 3.14 menunjukkan skema pengukuran kekasaran permukaan.



Gambar 3.14 Skema pengukuran kekasaran permukaan

3.5.2 Pengamatan *Surface Burning*

Surface burning adalah salah satu fenomena yang terjadi pada proses gerinda permukaan. Permukaan benda kerja yang mengalami *surface burning* akan tampak hangus akibat kenaikan temperatur yang sangat tinggi. Pengamatan *surface burning* pada penelitian ini dilakukan dengan cara

visual check. Benda kerja hasil proses penggerindaan diletakkan diatas meja dengan penerangan yang cukup, kemudian diamati secara visual dan dicatat muncul tidaknya fenomena *surface burning* beserta kualitas *surface burning*-nya.

3.5.3 Pengambilan Foto Bentuk Geram

Proses pemesinan gerinda permukaan, seperti halnya proses pemesinan yang lain, juga menghasilkan geram sebagai material yang terbuang. Perbedaan variabel proses gerinda permukaan menghasilkan bentuk geram yang berbeda-beda. Geram hasil percobaan dimasukkan kedalam cawan dan dikeringkan. Setiap geram yang dihasilkan oleh variabel bebas dimasukkan pada cawan yang berbeda-beda. Geram selanjutnya di *coating* dan diamati dengan SEM pada masing-masing kombinasi variabel bebas yang ditentukan.

3.6 Rancangan Percobaan

Penelitian ini menggunakan rancangan percobaan faktorial. Ada tiga faktor yang digunakan dalam penelitian ini. Satu faktor mempunyai dua level dan dua faktor yang lainnya masing-masing mempunyai tiga level. Susunan seperti itu bisa juga disebut desain faktorial $2 \times 3 \times 3$. Respon yang diteliti dalam penelitian ini adalah gaya tangensial, gaya normal, IPBK dan mode pembentukan geram. Replikasi dilakukan sebanyak dua kali pada pengukuran gaya tangensial, gaya normal dan kekasaran permukaan. Rancangan percobaan ditunjukkan pada Tabel 3.1.

Tabel 3.1 Rancangan percobaan

Variabel Proses			Variabel Respon					
Metode pendinginan	Kecepatan makan (mm/s)	Kedalaman potong (mm)	Gaya tangensial (N)		Gaya normal (N)		Kekasaran permukaan (μm)	
			Rep.1	Rep.2	Rep.1	Rep.2	Rep.1	Rep.2
MQL	150	0.01						
		0.03						
		0.06						
	200	0.01						
		0.03						
		0.06						
	250	0.01						
		0.03						
		0.06						
Dry	150	0.01						
		0.03						
		0.06						
	200	0.01						
		0.03						
		0.06						
	250	0.01						
		0.03						
		0.06						

BAB 4

ANALISIS DATA DAN PEMBAHASAN

4.1 Data Hasil Eksperimen

Pelaksanaan eksperimen dilakukan dengan mengkombinasikan variabel-variabel proses sesuai dengan rancangan eksperimen. Variabel-variabel proses tersebut adalah metode pendinginan, kecepatan makan dan kedalaman potong. Ketiga variabel proses tersebut diduga memiliki pengaruh yang signifikan terhadap gaya tangensial, gaya normal, IPBK dan mode pembentukan geram. Data hasil pengukuran gaya tangensial, gaya normal dan kekasaran permukaan ditunjukkan pada Tabel 4.1. Rincian data untuk kekasaran permukaan hasil dari eksperimen dapat dilihat pada Lampiran 2.

Tabel 4.1 Data hasil eksperimen gerinda permukaan

Variabel Proses			Variabel Respon					
Metode pendinginan	Kecepatan makan (mm/s)	Kedalaman potong (mm)	Gaya tangensial (N) (F_t)		Gaya normal (N) (F_z)		Kekasaran Permukaan (μm) (R_a)	
			Rep.1	Rep.2	Rep.1	Rep.2	Rep.1	Rep.2
Dry	150	0.01	34.43	35.45	75.06	70.04	0.57	0.55
		0.03	59.88	67.47	139.60	147.70	0.65	0.67
		0.06	99.52	106.67	235.50	236.50	0.70	0.72
	200	0.01	41.68	34.89	80.50	73.50	0.60	0.67
		0.03	63.15	62.70	142.27	144.60	0.66	0.70
		0.06	107.40	107.19	246.40	244.90	0.73	0.75
	250	0.01	42.04	37.29	81.95	80.59	0.66	0.74
		0.03	68.96	69.57	149.20	153.90	0.80	0.82
		0.06	111.74	108.85	249.90	251.90	0.97	0.90
MQL	150	0.01	17.21	15.24	53.12	48.33	0.64	0.61
		0.03	53.36	51.51	125.50	121.70	0.69	0.73
		0.06	90.99	93.50	201.20	197.40	0.95	0.95
	200	0.01	20.93	19.09	59.89	56.85	0.72	0.75
		0.03	59.67	58.40	132.80	126.30	0.85	0.67
		0.06	96.45	98.06	209.20	204.70	1.14	1.01
	250	0.01	22.54	26.17	62.99	66.47	0.78	0.84
		0.03	65.34	65.64	137.60	139.10	0.94	1.02
		0.06	103.62	106.68	216.70	219.90	1.40	1.52

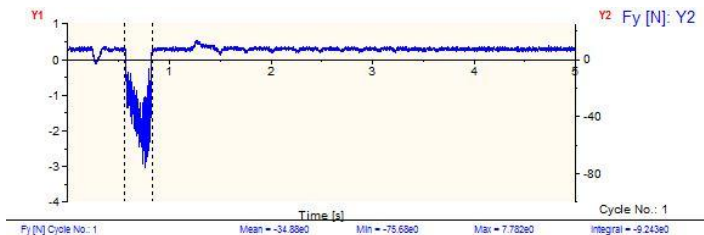
Sumber : Hasil pengukuran

4.2 Pengaruh Variabel Proses Terhadap Gaya Tangensial dan Gaya Normal

Pengukuran gaya tangensial dan gaya normal yang terjadi selama proses gerinda permukaan pada penelitian ini dilakukan dengan menggunakan dinamometer Kistler tipe 9272. Replikasi dilakukan sebanyak dua kali. Proses *dressing* dilakukan setiap kali spesimen diganti, sehingga butiran abrasif yang sudah tumpul hilang dan muncul sisi potong yang baru.

4.2.1 Pengaruh Variabel Proses Terhadap Gaya Tangensial

Gambar 4.1 menunjukkan contoh hasil pengukuran gaya tangensial (F_y) selama proses gerinda permukaan. Gambar grafik hasil pengukuran gaya tangensial secara lengkap dapat dilihat pada Lampiran 3.



Gambar 4.1 Gaya tangensial (F_y) yang terjadi pada proses gerinda permukaan dengan metode pendinginan *dry*, kecepatan makan 150 mm/s dan kedalaman potong 0.01 mm.

Metode pendinginan, kecepatan makan dan kedalaman potong diduga memiliki pengaruh yang signifikan terhadap gaya tangensial. Analisis variansi (ANOVA) digunakan untuk mengetahui variabel proses yang memiliki pengaruh secara signifikan terhadap gaya tangensial. Hasil analisis

variansi (ANOVA) untuk gaya tangensial ditunjukkan pada Tabel 4.2.

Tabel 4.2 Analisis variansi (ANOVA) variabel proses terhadap gaya tangensial.

<i>Source</i>	DF	SS	MS	F	<i>p-value</i>
Metode pendinginan	1	1050.6	1050.6	77.83	0.000
Kecepatan Makan	2	446.7	223.4	16.55	0.000
Kedalaman Potong	2	32642.8	16321.4	1209.07	0.000
Error	30	405.0	13.5		
Total	35	34535.2			

P-value yang lebih kecil dari *level of significant* (α) mengindikasikan bahwa variabel proses tersebut memiliki pengaruh yang signifikan terhadap respon. Pada penelitian ini α yang dipakai bernilai 5%. Penarikan kesimpulan menggunakan *p-value* untuk gaya tangensial adalah sebagai berikut:

1. Untuk variabel proses metode pendinginan

$P\text{-value} = 0.000 < \alpha = 0.05$, maka H_0 ditolak, artinya ada pengaruh variabel proses metode pendinginan terhadap gaya tangensial.

2. Untuk variabel proses kecepatan makan

$P\text{-value} = 0.000 < \alpha = 0.05$, maka H_0 ditolak, artinya ada pengaruh variabel proses kecepatan makan terhadap gaya tangensial.

3. Untuk variabel proses kedalaman potong

$P\text{-value} = 0.000 < \alpha = 0.05$, maka H_0 ditolak, artinya ada pengaruh variabel proses kedalaman potong terhadap gaya tangensial.

P-value diatas menunjukkan metode pendinginan, kecepatan makan dan kedalaman potong mempunyai pengaruh yang signifikan terhadap gaya tangensial. Rincian hasil perhitungan ANAVA variabel proses terhadap gaya tangensial ditunjukkan pada Lampiran 4. Kesimpulan masing-masing variabel proses terhadap gaya tangensial ditunjukkan oleh Tabel 4.3 sebagai berikut:

Tabel 4.3 Kondisi hipotesis nol pada respon gaya tangensial

Sumber variasi	Kesimpulan
Metode pendinginan	Berpengaruh
Kecepatan makan	Berpengaruh
Kedalaman potong	Berpengaruh

Sumber: Hasil perhitungan

Untuk mengetahui level dari metode pendinginan, kecepatan makan dan kedalaman potong yang memberikan pengaruh yang berbeda terhadap gaya tangensial, maka dilakukan uji Tukey. Tabel 4.4 sampai dengan Tabel 4.6 menunjukkan hasil uji Tukey pada metode pendinginan, kecepatan makan dan kedalaman potong. Rincian uji Tukey dari variabel proses terhadap gaya tangensial ditunjukkan pada Lampiran 4.

Tabel 4.4 Hasil uji Tukey pada metode pendinginan

Metode pendinginan	N	Mean	Grouping
<i>Dry</i>	18	69.9378	A
MQL	18	59.1333	B

Tabel 4.5 Hasil uji Tukey pada kecepatan makan

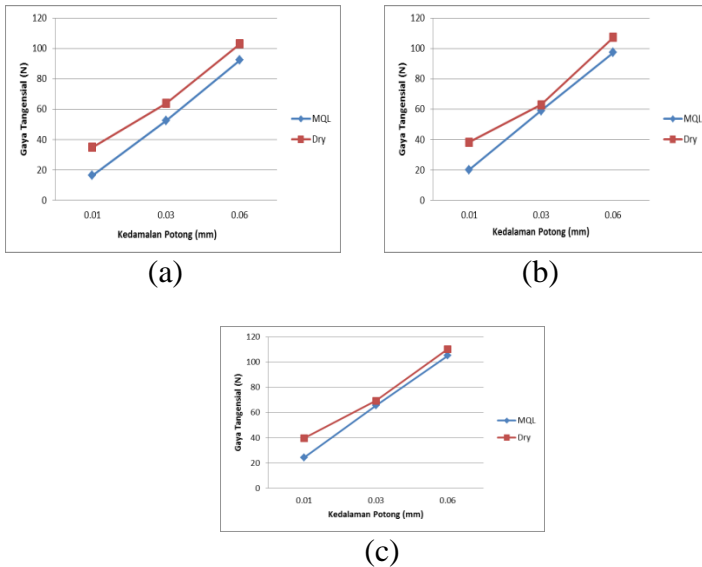
Kecepatan Makan (mm/s)	N	Mean	Grouping
250	12	69.0367	A
200	12	64.1342	B
150	12	60.4358	B

Tabel 4.6 Hasil uji Tukey pada kedalaman potong

Kedalaman Potong (mm)	N	Mean	Grouping
0.06	12	102.556	A
0.03	12	62.137	B
0.01	12	28.913	C

Hasil uji Tukey pada Tabel 4.4 menunjukkan bahwa gaya tangensial yang dihasilkan berbeda pada dua metode pendinginan yang dipakai pada penelitian ini. Tabel 4.5 menunjukkan bahwa kekasaran yang dihasilkan pada kecepatan makan 250 mm/s berbeda dengan kekasaran yang dihasilkan pada kecepatan makan 200 mm/s dan 150 mm/s. Tabel 4.5 juga menunjukkan bahwa kekasaran yang dihasilkan pada kecepatan makan 200 mm/s sama dengan kekasaran yang dihasilkan pada kecepatan makan 150 mm/s. Tabel 4.6 menunjukkan bahwa gaya tangensial yang dihasilkan berbeda pada ketiga level kedalaman potong pada proses gerinda permukaan.

Hubungan antara metode pendinginan, kecepatan makan dan kedalaman potong terhadap gaya tangensial dapat juga ditunjukkan oleh grafik pada Gambar 4.2.



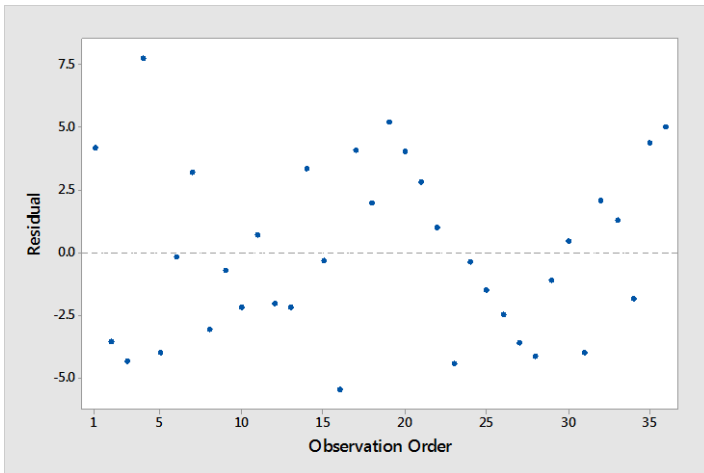
Gambar 4.2 Grafik hubungan antara kedalaman potong dengan gaya tangensial dengan (a) $V_f = 150$ mm/s, (b) $V_f = 200$ mm/s dan (c) $V_f = 250$ mm/s

Gambar 4.2 menunjukkan bahwa penggunaan MQL pada proses gerinda dapat menurunkan gaya tangensial. Turunnya gaya tangensial ini disebabkan karena *cutting fluid* yang disemprotkan akan membentuk lapisan pelumas, dimana lapisan pelumas ini akan meningkatkan efek *slip* pada butiran-butiran abrasif dengan benda kerja (Sadeghi dkk., 2009). Peningkatan nilai kecepatan makan akan membuat gaya tangensial bertambah besar dan peningkatan kedalaman potong juga akan meningkatkan gaya tangensial. Peningkatan kedalaman potong menyebabkan bidang geser bertambah lebar. Hal ini membuat gaya tangensial semakin besar.

4.2.2 Pengujian Asumsi Residual Gaya Tangensial

4.2.2.1 Uji Identik

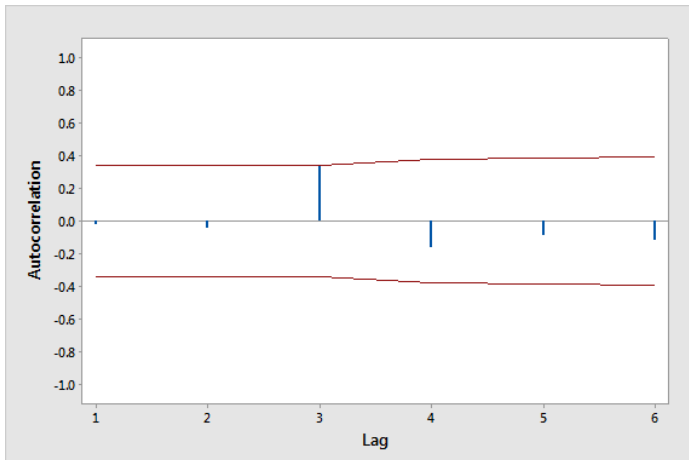
Gambar 4.3 menunjukkan bahwa residual tersebar secara acak dan tidak membentuk pola tertentu. Dengan demikian asumsi residual identik terpenuhi.



Gambar 4.3 Plot residual gaya tangensial *versus order*

4.2.2.2 Uji Independen

Pengujian independen pada penelitian ini dilakukan dengan menggunakan *auto correlation function* (ACF). Berdasarkan plot ACF yang ditunjukkan pada Gambar 4.4, tidak ada nilai ACF pada setiap *lag* yang keluar dari batas interval. Hal ini membuktikan bahwa tidak ada korelasi antara residual yang artinya residual bersifat independen.



Gambar 4.4 Plot ACF pada respon gaya tangensial

4.2.2.3 Uji Kenormalan

Uji kenormalan residual dilakukan dengan menggunakan uji Kolmogorov-Smirnov. Hipotesis yang digunakan adalah:

H_0 : Residual berdistribusi normal

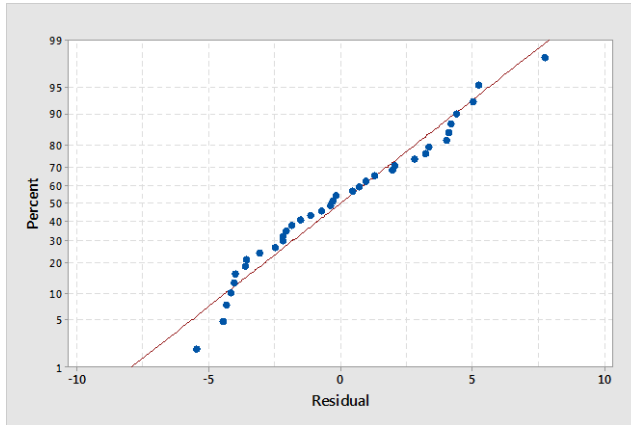
H_1 : Residual tidak berdistribusi normal

H_0 ditolak jika p -value lebih kecil dari pada $\alpha = 0,05$.

Gambar 4.5 menunjukkan bahwa dengan uji Kolmogorov-Smirnov diperoleh:

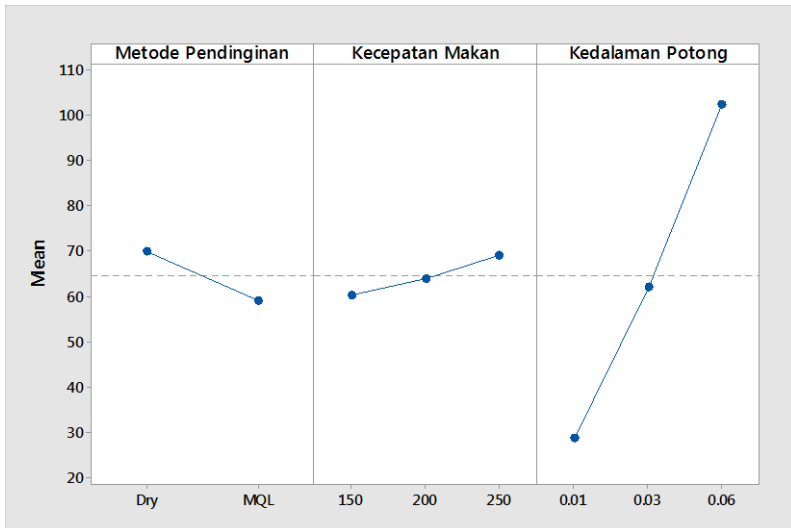
- P -value bernilai >0.150 yang berarti lebih besar dari $\alpha = 0,05$. Oleh karena itu dapat disimpulkan bahwa H_0 gagal ditolak atau residual berdistribusi normal.
- $Mean$ bernilai sebesar -2.195774^{-14} yang berarti sangat kecil atau mendekati nol.
- Variansi di residual adalah sebesar $0,095^2 = 0,009025$

Dengan demikian asumsi residual berdistribusi normal dengan nilai *mean* sama dengan nol (atau mendekati nol) dan memiliki variansi tertentu (sebesar 0,009025) telah terpenuhi.



Gambar 4.5 Plot uji distribusi normal pada respon gaya tangensial

Secara grafik, hubungan antara variabel metode pendinginan, kecepatan makan dan kedalaman potong pada proses gerinda permukaan terhadap respon gaya tangensial ditunjukkan pada Gambar 4.6.

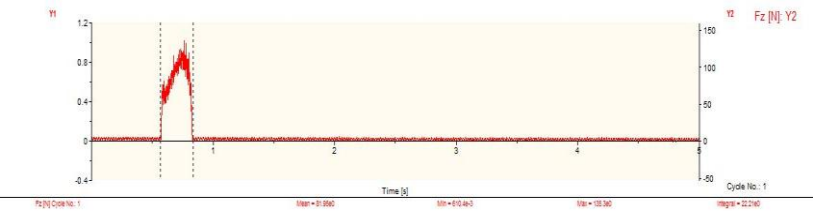


Gambar 4.6 Grafik pengaruh metode pendinginan, kecepatan makan dan kedalaman potong terhadap gaya tangensial

Gambar 4.6 menunjukkan bahwa metode pendinginan menghasilkan gaya tangensial yang berbeda, yaitu proses gerinda permukaan yang menggunakan MQL mempunyai gaya tangensial yang lebih kecil. Nilai gaya tangensial yang terendah terjadi pada kombinasi metode pendinginan MQL, kecepatan makan 150 mm/s dan kedalaman potong 0,01 mm yaitu sebesar 34,43 N. Nilai gaya tangensial yang tertinggi terjadi pada kombinasi metode pendinginan *dry*, kecepatan makan 250 mm/s dan kedalaman potong 0,06 mm yaitu sebesar 106,6 N.

4.2.3 Pengaruh Variabel Proses Terhadap Gaya Normal

Gambar 4.7 menunjukkan contoh hasil pengukuran gaya gaya normal (F_z) selama proses gerinda permukaan. Gambar grafik hasil pengukuran gaya normal secara lengkap dapat dilihat pada Lampiran 3.



Gambar 4.7 Gaya normal (F_z) yang terjadi pada proses gerinda permukaan dengan metode pendinginan *dry*, kecepatan makan 150 mm/s dan kedalaman potong 0.01 mm.

Metode pendinginan, kecepatan makan dan kedalaman potong diduga memiliki pengaruh yang signifikan terhadap gaya normal. Analisis variansi (ANOVA) digunakan untuk mengetahui variabel proses yang memiliki pengaruh secara signifikan terhadap gaya normal. Hasil analisis variansi (ANOVA) untuk gaya normal ditunjukkan pada Tabel 4.7.

Tabel 4.7 Analisis variansi (ANOVA) variabel proses terhadap gaya normal.

Source	DF	SS	MS	F	p-value
Metode pendinginan	1	5000	5000	150.84	0.000
Kecepatan Makan	2	1052	526	15.87	0.000
Kedalaman Potong	2	151767	75884	2289.30	0.000
Error	30	994	33		
Total	35	158813			

P-value yang lebih kecil dari *level of significant* (α) mengindikasikan bahwa variabel proses tersebut memiliki pengaruh yang signifikan terhadap respon. Pada penelitian ini α yang dipakai bernilai 5%. Penarikan kesimpulan menggunakan *p-value* untuk gaya normal adalah sebagai berikut:

1. Untuk variabel proses metode pendinginan

$P\text{-value} = 0.000 < \alpha = 0.05$, maka H_0 ditolak, artinya ada pengaruh variabel proses metode pendinginan terhadap gaya normal.

2. Untuk variabel proses kecepatan makan

$P\text{-value} = 0.000 < \alpha = 0.05$, maka H_0 ditolak, artinya ada pengaruh variabel proses kecepatan makan terhadap gaya normal.

3. Untuk variabel proses kedalaman potong

$P\text{-value} = 0.000 < \alpha = 0.05$, maka H_0 ditolak, artinya ada pengaruh variabel proses kedalaman potong terhadap gaya normal.

P-value diatas menunjukkan metode pendinginan, kecepatan makan dan kedalaman potong mempunyai pengaruh yang signifikan terhadap gaya normal. Rincian hasil perhitungan ANAVA variabel proses terhadap gaya normal ditunjukkan pada Lampiran 4. Kesimpulan masing-masing variabel proses terhadap gaya normal ditunjukkan oleh Tabel 4.8 sebagai berikut:

Tabel 4.8 Kondisi hipotesis nol pada respon gaya tangensial

Sumber variasi	Kesimpulan
Metode pendinginan	Berpengaruh
Kecepatan makan	Berpengaruh
Kedalaman potong	Berpengaruh

Sumber: Hasil perhitungan

Untuk mengetahui level dari metode pendinginan, kecepatan makan dan kedalaman potong yang memberikan pengaruh yang berbeda terhadap gaya normal, maka dilakukan uji Tukey. Tabel 4.9 sampai dengan Tabel 4.11 menunjukkan hasil uji Tukey pada metode pendinginan, kecepatan makan dan kedalaman potong. Rincian uji Tukey dari variabel proses terhadap gaya normal ditunjukkan pada Lampiran 4.

Tabel 4.9 Hasil uji Tukey pada metode pendinginan

Metode pendinginan	N	Mean	Grouping
<i>Dry</i>	18	155.778	A
MQL	18	132.208	B

Tabel 4.10 Hasil uji Tukey pada kecepatan makan

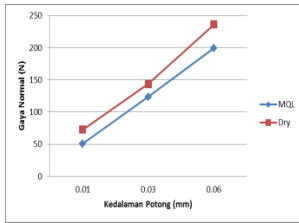
Kecepatan Makan (mm/s)	N	Mean	Grouping
250	12	150.850	A
200	12	143.493	B
150	12	137.637	C

Tabel 4.11 Hasil uji Tukey pada kedalaman potong

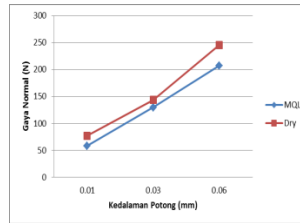
Kedalaman Potong (mm)	N	Mean	Grouping
0.06	12	226.183	A
0.03	12	138.356	B
0.01	12	67.441	C

Hasil uji Tukey pada Tabel 4.9 menunjukkan bahwa gaya normal yang dihasilkan berbeda pada dua metode pendinginan yang dipakai pada penelitian ini. Tabel 4.10 menunjukkan bahwa gaya normal yang dihasilkan berbeda pada ketiga level kecepatan makan pada proses gerinda permukaan. Tabel 4.11 menunjukkan bahwa gaya normal yang dihasilkan berbeda pada ketiga level kedalaman potong pada proses gerinda permukaan.

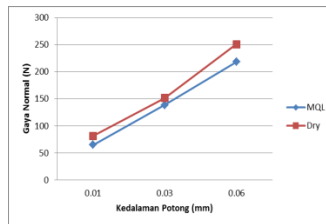
Hubungan antara metode pendinginan, kecepatan makan dan kedalaman potong terhadap gaya normal dapat juga ditunjukkan oleh grafik pada Gambar 4.8.



(a)



(b)



(c)

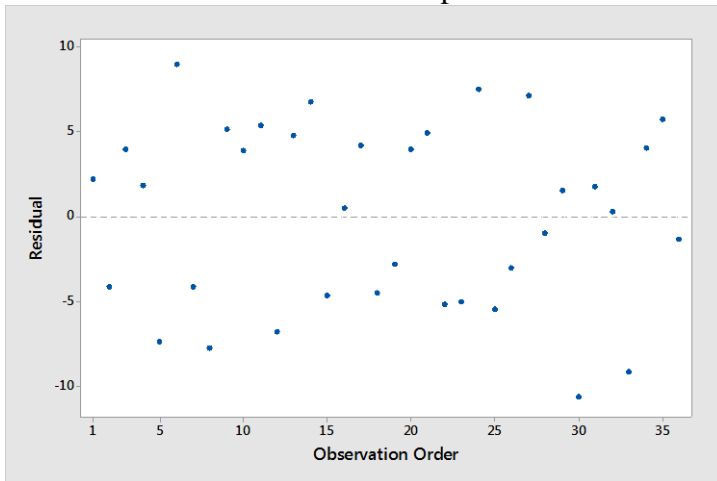
Gambar 4.8 Grafik hubungan antara kedalaman potong dengan gaya normal dengan (a) $V_f = 150$ mm/s, (b) $V_f = 200$ mm/s dan (c) $V_f = 250$ mm/s

Gambar 4.8 menunjukkan bahwa penggunaan MQL pada proses gerinda dapat menurunkan gaya normal. Peningkatan nilai kecepatan makan akan membuat gaya normal bertambah dan peningkatan kedalaman potong juga akan meningkatkan gaya normal.

4.2.4 Pengujian Asumsi Residual Gaya Normal

4.2.4.1 Uji Identik

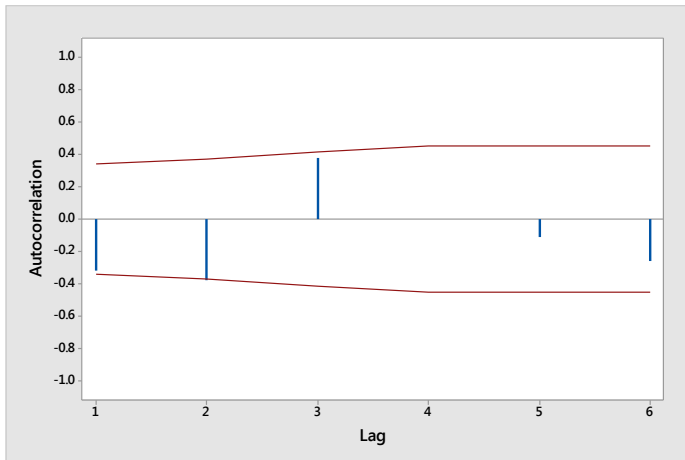
Gambar 4.9 menunjukkan bahwa residual tersebar secara acak dan tidak membentuk pola tertentu. Dengan demikian asumsi residual identik terpenuhi.



Gambar 4.9 Plot residual gaya normal *versus order*

4.2.4.2 Uji Independen

Pengujian independen pada penelitian ini dilakukan dengan menggunakan *auto correlation function* (ACF). Berdasarkan plot ACF yang ditunjukkan pada Gambar 4.10, tidak ada nilai ACF pada setiap *lag* yang keluar dari batas interval. Hal ini membuktikan bahwa tidak ada korelasi antara residual yang artinya residual bersifat independen.



Gambar 4.10 Plot ACF pada respon gaya normal

4.2.4.3 Uji Kenormalan

Uji kenormalan residual dilakukan dengan menggunakan uji Kolmogorov-Smirnov. Hipotesis yang digunakan adalah:

H_0 : Residual berdistribusi normal

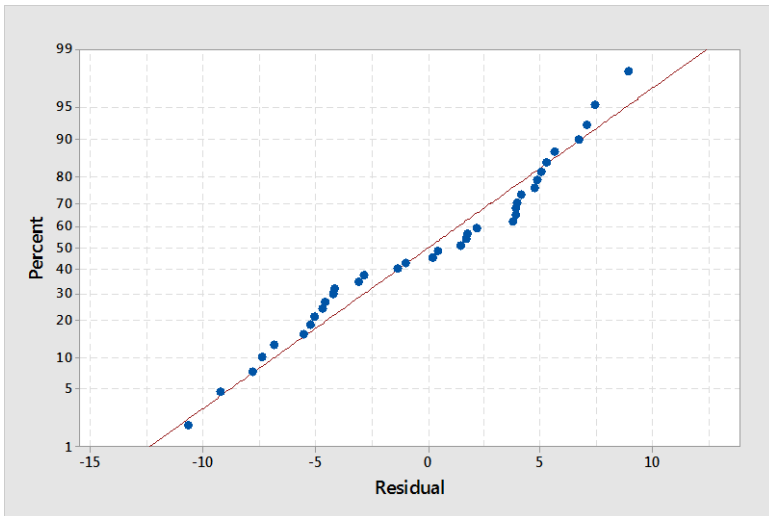
H_1 : Residual tidak berdistribusi normal

H_0 ditolak jika p -value lebih kecil dari pada $\alpha = 0,05$.

Gambar 4.11 menunjukkan bahwa dengan uji Kolmogorov-Smirnov diperoleh:

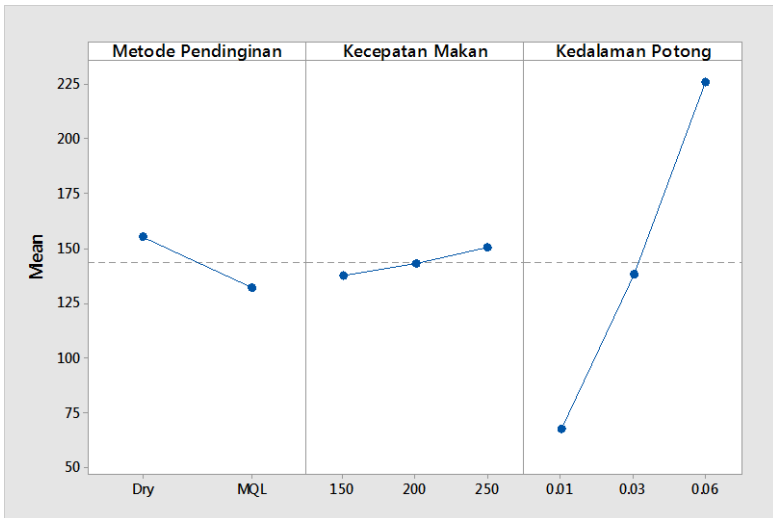
- P -value bernilai $>0,150$ yang berarti lebih besar dari $\alpha = 0,05$. Oleh karena itu dapat disimpulkan bahwa H_0 gagal ditolak atau residual berdistribusi normal.
- $Mean$ bernilai sebesar $-2,17110 \times 10^{-15}$ yang berarti sangat kecil atau mendekati nol.
- Variansi di residual adalah sebesar $0,152^2 = 0,023104$

Dengan demikian asumsi residual berdistribusi normal dengan nilai *mean* sama dengan nol (atau mendekati nol) dan memiliki variansi tertentu (sebesar 0,023104) telah terpenuhi.



Gambar 4.11 Plot uji distribusi normal pada respon gaya normal

Secara grafik, hubungan antara variabel metode pendinginan, kecepatan makan dan kedalaman potong pada proses gerinda permukaan terhadap respon gaya normal ditunjukkan pada Gambar 4.12.



Gambar 4.12 Grafik pengaruh metode pendinginan, kecepatan makan dan kedalaman potong terhadap gaya normal

Gambar 4.12 menunjukkan bahwa metode pendinginan menghasilkan gaya normal yang berbeda, yaitu proses gerinda permukaan yang menggunakan MQL mempunyai gaya normal yang lebih kecil. Nilai gaya normal terendah terjadi pada kombinasi metode pendinginan MQL, kecepatan makan 150 mm/s dan kedalaman potong 0,01 mm yaitu sebesar 70,04 N. Nilai gaya normal tertinggi terjadi pada kombinasi metode pendinginan *dry*, kecepatan makan 250 mm/s dan kedalaman potong 0,06 mm yaitu sebesar 219,90 N.

4.3 Pemodelan Matematis Untuk Gaya Tangensial

Hasil regresi untuk gaya tangensial dengan menggunakan Minitab dapat dilihat pada tabel 4.12 dan 4.13 sebagai berikut:

Tabel 4.12 Hasil ANAVA untuk gaya tangensial

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Regression	2	1.53306	0.76503	563.22	0.000
Kecepatan Makan	1	0.03602	0.03602	26.51	0.000
Kedalaman Potong	1	1.49404	1.49404	1099.93	0.000
Error	15	0.02037	0.00136		
Total	17	1.55043			

Tabel 4.13 Koefisien regresi untuk model gaya tangensial

Term	Coef	SE Coef	T	P
Constant	1.980	0.224	8.86	0.000
Kecepatan Makan	0.4926	0.0957	5.51	0.000
Kedalaman Potong	0.8993	0.0271	33.17	0.000
S = 0.0368552 R-Sq = 98.69% R-Sq(adj) = 98.00%				

4.3.1 Uji Regresi

4.3.1.1 Uji Koefisien Regresi Secara Serempak

Hipotesis untuk uji koefisien regresi secara serempak dari gaya tangensial adalah sebagai berikut:

H_0 : Semua β_1 tidak mempunyai pengaruh terhadap gaya tangensial.

H_1 : Paling tidak ada satu dari β_1 mempunyai pengaruh terhadap gaya tangensial.

Dari tabel 4.12 terlihat bahwa pada pengujian dengan $\alpha = 0.05$, p -value dari regresi sama dengan nol yaitu lebih kecil dari 0.05, sehingga H_0 ditolak. Ini berarti bahwa model dapat diterima secara statistik dan telah mewakili data.

4.3.1.2 Uji Koefisien Regresi Secara Individu

Hipotesis untuk uji koefisien regresi secara individu dari gaya tangensial adalah sebagai berikut:

$H_0: \beta_1 = 0$ untuk setiap i .

$H_1: \beta_1 \neq 0$ untuk setiap i .

Dari Tabel 4.13 menunjukkan bahwa pada pengujian dengan $\alpha = 0.05$, *p-value* untuk kecepatan makan dan kedalaman potong lebih kecil dari 0.05 yang berarti H_0 ditolak. Dengan demikian variabel koefisien kecepatan adalah sebesar 0,4926 makan dan koefisien kedalaman potong adalah sebesar 0,8993.

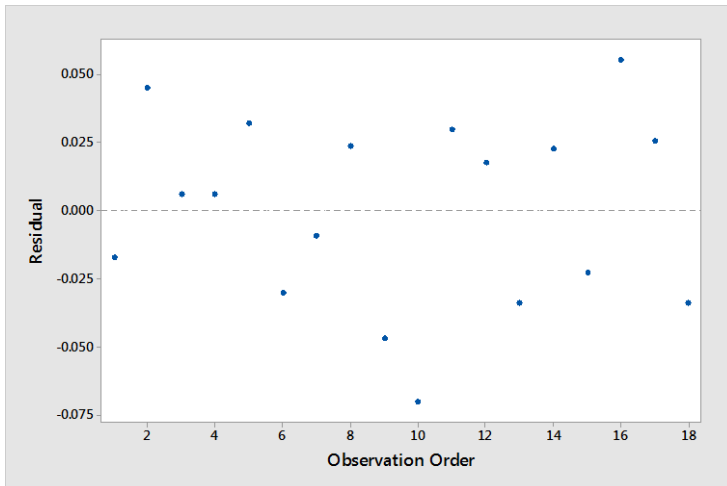
4.3.1.3 Uji Koefisien Determinasi (R^2)

Dari Tabel 4.13 menunjukkan bahwa R^2 untuk persamaan regresi gaya tangensial adalah 98.69%, artinya menunjukkan bahwa 98.69% variasi pada Y diterangkan oleh model regresi linier yang digunakan.

4.3.2 Uji Asumsi Residual

4.3.2.1 Uji Identik

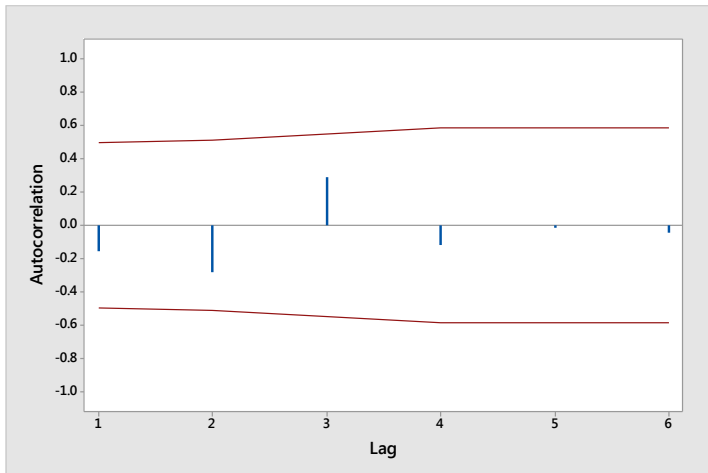
Gambar 4.13 menunjukkan bahwa residual tersebar secara acak dan tidak membentuk pola tertentu. Dengan demikian asumsi residual identik terpenuhi.



Gambar 4.13 Plot residual gaya tangensial *versus order*

4.3.2.2 Uji Independen

Pengujian independen pada penelitian ini dilakukan dengan menggunakan *auto correlation function* (ACF). Berdasarkan plot ACF yang ditunjukkan pada Gambar 4.14, tidak ada nilai ACF pada setiap *lag* yang keluar dari batas interval. Hal ini membuktikan bahwa tidak ada korelasi antara residual, yang artinya residual bersifat independen.



Gambar 4.14 Plot ACF pada respon gaya tangensial

4.3.2.3 Uji Kenormalan

Uji kenormalan residual dilakukan dengan menggunakan uji Kolmogorov-Smirnov. Hipotesis yang digunakan adalah:

H_0 : Residual berdistribusi normal

H_1 : Residual tidak berdistribusi normal

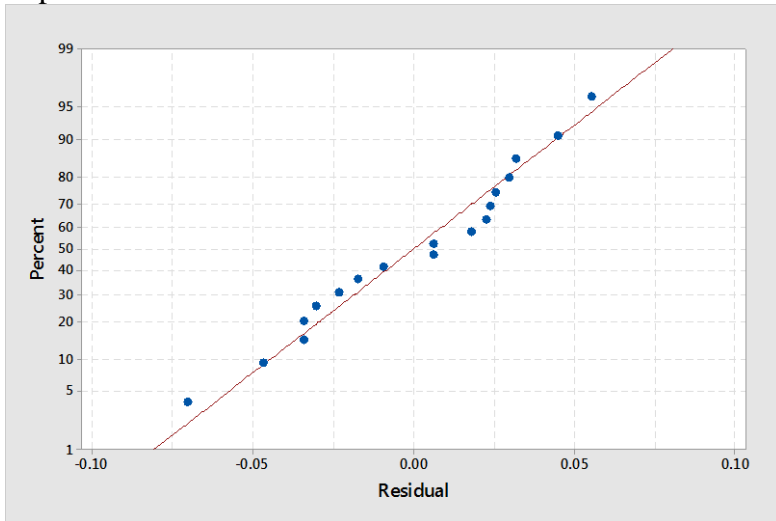
H_0 ditolak jika p -value lebih kecil dari pada $\alpha = 0.05$.

Gambar 4.15 menunjukkan bahwa dengan uji Kolmogorov-Smirnov diperoleh:

- P -value bernilai > 0.150 yang berarti lebih kecil dari $\alpha = 0.05$. Oleh karena itu dapat disimpulkan bahwa H_0 gagal ditolak atau residual berdistribusi normal.
- $Mean$ bernilai sebesar $1,233581 \times 10^{-16}$ yang berarti sangat kecil atau mendekati nol.
- Variansi di residual adalah sebesar $0.142^2 = 0.020164$

Dengan demikian asumsi residual berdistribusi normal dengan nilai $mean$ sama dengan nol (atau mendekati

no) dan memiliki variansi tertentu (sebesar 0.020164) telah terpenuhi.



Gambar 4.15 Plot uji distribusi normal pada respon gaya tangensial

Koefisien regresi hasil perhitungan dapat digunakan untuk membuat model regresi sebagai berikut:

$$\text{Log Gaya Tangensial} = 1.980 + 0.4926 \text{ Log Kecepatan Makan} + 0.8993 \text{ Log Kedalaman Potong}$$

atau

$$\text{Gaya Tangensial} = 95.4993 \times \text{Kecepatan Makan}^{0.4926} \times \text{Kedalaman Potong}^{0.8993}$$

4.4 Pemodelan Matematis Untuk Gaya Normal

Hasil regresi untuk gaya normal dengan menggunakan Minitab dapat dilihat pada tabel 4.14 dan 4.15 sebagai berikut:

Tabel 4.14 Hasil ANAVA untuk gaya normal

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Regression	2	0.967472	0.483736	1388.17	0.000
Kecepatan Makan	1	0.012585	0.012585	36.11	0.000
Kedalaman Potong	1	0.954887	0.954887	2740.22	0.000
Error	15	0.005227	0.000348		
Total	17	0.972699			

Tabel 4.15 Koefisien regresi untuk model gaya normal

Predictor	Coef	SE Coef	T	P
Constant	2.534	0.113	22.38	0.000
Kecepatan Makan	0.2912	0.0485	6.01	0.000
Kedalaman Potong	0.7189	0.0137	52.35	0.000
S = 0.0186674 R-Sq = 99.46% R-Sq(adj) = 99.39%				

4.4.1 Uji Regresi

4.4.1.1 Uji Koefisien Regresi Secara Serempak

Hipotesis untuk uji koefisien regresi secara serempak dari gaya normal adalah sebagai berikut:

H_0 : Semua β_1 tidak mempunyai pengaruh terhadap gaya normal.

H_1 : Paling tidak ada satu dari β_1 mempunyai pengaruh terhadap gaya normal.

Dari tabel 4.14 terlihat bahwa pada pengujian dengan $\alpha = 0.05$, *p-value* dari regresi sama dengan nol yaitu lebih

kecil dari 0.05, sehingga H_0 ditolak. Ini berarti bahwa model dapat diterima secara statistik dan telah mewakili data.

4.4.1.2 Uji Koefisien Regresi Secara Individu

Hipotesis untuk uji koefisien regresi secara individu dari gaya normal adalah sebagai berikut:

$H_0: \beta_1 = 0$ untuk setiap i .

$H_1: \beta_1 \neq 0$ untuk setiap i .

Dari tabel 4.15 menunjukkan bahwa pada pengujian dengan $\alpha = 0.05$, p -value untuk kecepatan makan, dan kedalaman potong lebih kecil dari 0.05 yang berarti H_0 ditolak. Dengan demikian koefisien kecepatan makan adalah sebesar 0.2912 dan koefisien kedalaman potong adalah sebesar 0.7189.

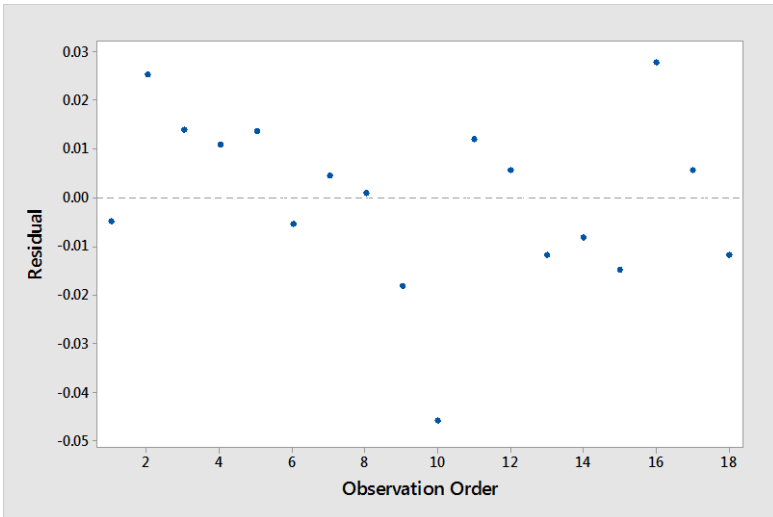
4.4.1.3 Uji Koefisien Determinasi (R^2)

Dari tabel 4.15 menunjukkan bahwa R^2 untuk persamaan regresi gaya normal adalah 99.46%, artinya menunjukkan bahwa 99.46% variasi pada Y diterangkan oleh model regresi linier yang digunakan.

4.4.2 Uji Asumsi Residual

4.4.2.1 Uji Identik

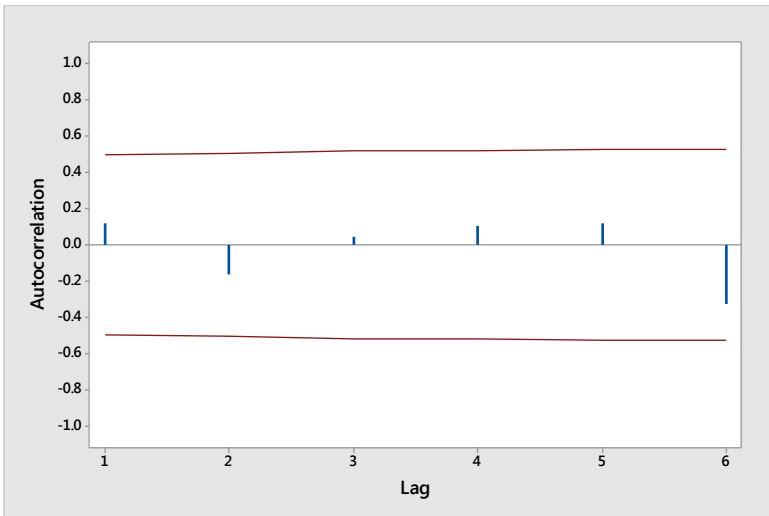
Gambar 4.16 menunjukkan bahwa residual tersebar secara acak dan tidak membentuk pola tertentu. Dengan demikian asumsi residual identik terpenuhi.



Gambar 4.16 Plot residual gaya normal *versus order*

4.4.2.2 Uji Independen

Pengujian independen pada penelitian ini dilakukan dengan menggunakan *auto correlation function* (ACF). Berdasarkan plot ACF yang ditunjukkan pada Gambar 4.17, tidak ada nilai ACF pada setiap *lag* yang keluar dari batas interval. Hal ini membuktikan bahwa tidak ada korelasi antara residual, yang artinya residual bersifat independen.



Gambar 4.17 Plot ACF pada respon gaya normal

4.4.2.3 Uji Kenormalan

Uji kenormalan residual dilakukan dengan menggunakan uji Kolmogorov-Smirnov. Hipotesis yang digunakan adalah:

H_0 : Residual berdistribusi normal

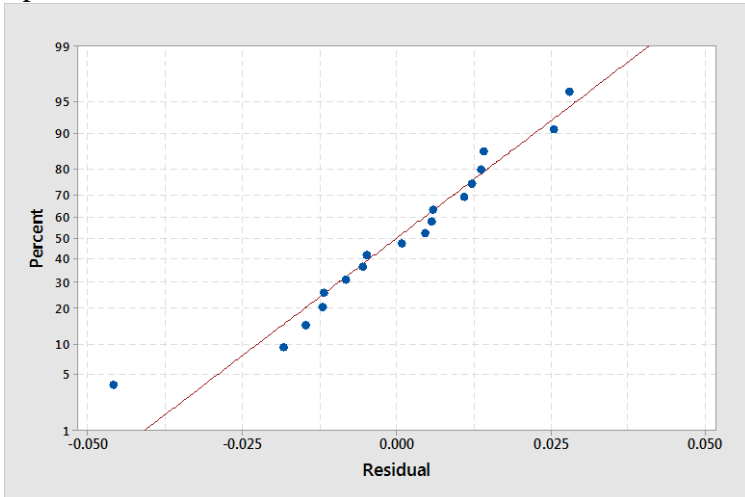
H_1 : Residual tidak berdistribusi normal

H_0 ditolak jika *p-value* lebih kecil dari pada $\alpha = 0.05$.

Gambar 4.18 menunjukkan bahwa dengan uji Kolmogorov-Smirnov diperoleh:

- *P-value* bernilai >0.150 yang berarti lebih kecil dari $\alpha = 0.05$. Oleh karena itu dapat disimpulkan bahwa H_0 ditolak atau residual berdistribusi normal.
- *Mean* bernilai sebesar $3,330669 \times 10^{-16}$ yang berarti sangat kecil atau mendekati nol.
- Variansi di residual adalah sebesar $0.102^2 = 0.010404$

Dengan demikian asumsi residual berdistribusi normal dengan nilai *mean* sama dengan nol (atau mendekati nol) dan memiliki variansi tertentu (sebesar 0.010404) telah terpenuhi.



Gambar 4.18 Plot uji distribusi normal pada respon gaya normal

Koefisien regresi hasil perhitungan dapat digunakan untuk membuat model regresi sebagai berikut:

$$\text{Log Gaya Normal} = 2.534 + 0.2912 \text{ Log Kecepatan Makan} + 0.7189 \text{ Log Kedalaman Potong}$$

atau

$$\text{Gaya Normal} = 341.939 \times \text{Kecepatan Makan}^{0.2912} \times \text{Kedalaman Potong}^{0.7189}$$

4.5 Pengaruh Variabel Proses Terhadap Kekasaran Permukaan

Pengambilan data untuk kekasaran permukaan benda kerja dilakukan dengan replikasi sebanyak dua kali. Pengukuran kekasaran tiap spesimen dilakukan di tiga tempat, yaitu pada posisi awal, tengah dan akhir dari pemakanan seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3.13. Pengukuran kekasaran permukaan dilakukan sebanyak tiga kali pada setiap tempatnya.

Analisis variansi (ANOVA) digunakan untuk mengetahui variabel proses yang memiliki pengaruh secara signifikan terhadap kekasaran permukaan. Hasil analisis variansi (ANOVA) untuk kekasaran permukaan ditunjukkan pada Tabel 4.16.

Tabel 4.16 Analisis variansi (ANOVA) variabel proses terhadap kekasaran permukaan

<i>Source</i>	DF	SS	MS	F	<i>p-value</i>
Metode pendinginan	1	0.31091	0.310909	30.32	0.000
Kecepatan Makan	2	0.39145	0.195723	19.08	0.000
Kedalaman Potong	2	0.56964	0.284822	27.77	0.000
Error	30	0.30767	0.010256		
Total	35	1.57967			

P-value yang lebih kecil dari *level of significant* (α) mengindikasikan bahwa variabel proses tersebut memiliki pengaruh yang signifikan terhadap respon. Pada penelitian ini α yang dipakai bernilai 5%. Penarikan kesimpulan menggunakan *p-value* untuk kekasaran permukaan adalah sebagai berikut:

1. Untuk variabel proses metode pendinginan

$P\text{-value} = 0.000 < \alpha = 0.05$, maka H_0 ditolak, artinya ada pengaruh variabel proses metode pendinginan terhadap kekasaran permukaan.

2. Untuk variabel proses kecepatan makan

$P\text{-value} = 0.000 < \alpha = 0.05$, maka H_0 ditolak, artinya ada pengaruh variabel proses kecepatan makan terhadap kekasaran permukaan.

3. Untuk variabel proses kedalaman potong

$P\text{-value} = 0.000 < \alpha = 0.05$, maka H_0 ditolak, artinya ada pengaruh variabel proses kedalaman potong terhadap kekasaran permukaan.

$P\text{-value}$ diatas menunjukkan metode pendinginan, kecepatan makan dan kedalaman potong mempunyai pengaruh yang signifikan terhadap kekasaran permukaan. Rincian hasil perhitungan ANAVA variabel proses terhadap kekasaran permukaan ditunjukkan pada Lampiran 5. Kesimpulan masing-masing variabel proses terhadap kekasaran permukaan ditunjukkan oleh Tabel 4.17 sebagai berikut:

Tabel 4.17 Kondisi hipotesis nol pada respon kekasaran permukaan

Sumber variasi	Kesimpulan
Metode pendinginan	Berpengaruh
Kecepatan makan	Berpengaruh
Kedalaman potong	Berpengaruh

Sumber : Hasil perhitungan

Untuk mengetahui level dari metode pendinginan, kecepatan makan dan kedalaman potong yang memberikan pengaruh yang berbeda terhadap kekasaran permukaan, maka dilakukan uji Tukey. Tabel 4.18 sampai dengan Tabel 4.20 menunjukkan hasil uji Tukey pada metode pendinginan, kecepatan makan dan kedalaman potong. Rincian uji Tukey dari variabel proses terhadap kekasaran permukaan ditunjukkan pada Lampiran 5.

Tabel 4.18 Hasil uji Tukey pada metode pendinginan

Metode pendinginan	N	Mean	Grouping
MQL	18	0.900185	A
Dry	18	0.714321	B

Tabel 4.19 Hasil uji Tukey pada kecepatan makan

Kecepatan Makan (mm/s)	N	Mean	Grouping
250	12	0.949167	A
200	12	0.771019	B
150	12	0.701574	B

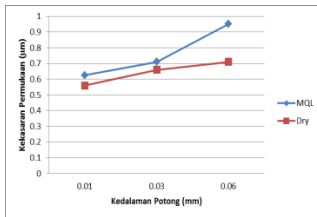
Tabel 4.20 Hasil uji Tukey pada kedalaman potong

Kedalaman Potong (mm)	N	Mean	Grouping
0.06	12	0.977407	A
0.03	12	0.767130	B
0.01	12	0.677222	B

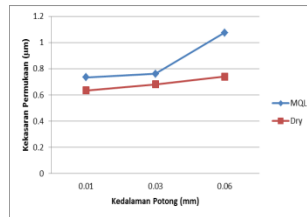
Hasil uji Tukey pada Tabel 4.18 menunjukkan bahwa kekasaran permukaan yang dihasilkan berbeda pada dua metode pendinginan yang dipakai dalam penelitian ini. Tabel 4.19 menunjukkan bahwa kekasaran yang dihasilkan pada kecepatan makan 250 mm/s berbeda dengan kekasaran

yang dihasilkan pada kecepatan makan 200 mm/s dan 150 mm/s. Tabel 4.19 juga menunjukkan bahwa kekasaran yang dihasilkan pada kecepatan makan 200 mm/s sama dengan kekasaran yang dihasilkan pada kecepatan makan 150 mm/s. Tabel 4.20 menunjukkan bahwa kekasaran yang dihasilkan dengan kedalaman potong 0.06 mm berbeda dengan kekasaran yang dihasilkan pada kedalaman potong 0.03 mm dan kedalaman potong 0.01 mm. Tabel 4.20 juga menunjukkan bahwa kekasaran yang dihasilkan pada kedalaman potong 0.03 mm sama dengan kekasaran yang dihasilkan pada kedalaman potong 0.01 mm.

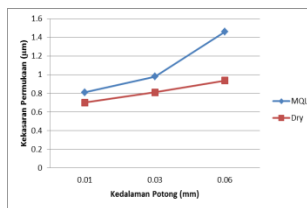
Hubungan antara metode pendinginan, kecepatan makan dan kedalaman potong terhadap kekasaran permukaan dapat juga ditunjukkan oleh grafik pada Gambar 4.19.



(a)



(b)



(c)

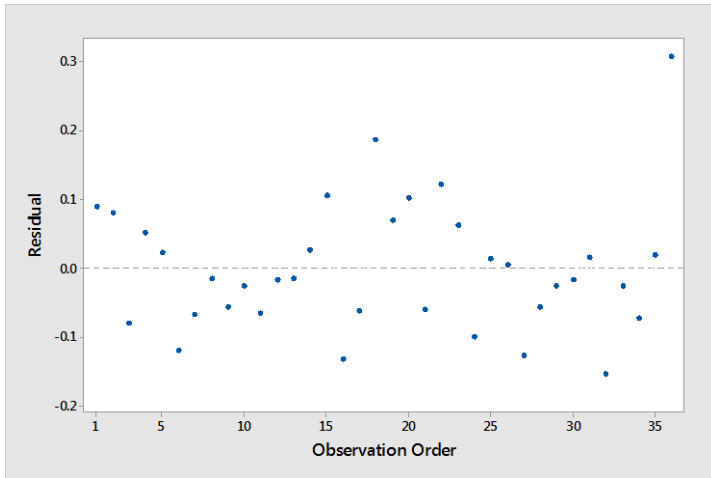
Gambar 4.19 Grafik hubungan antara kedalaman potong dengan kekasaran permukaan dengan (a) $V_f = 150$ mm/s, (b) $V_f = 200$ mm/s dan (c) $V_f = 250$ mm/s

Gambar 4.19 menunjukkan bahwa penggunaan MQL akan menghasilkan kekasaran juga akan meningkatkan kekasaran permukaan untuk proses penggerindaan permukaan yang menggunakan MQL maupun yang tanpa menggunakan pendingin atau kering.

4.5.1 Pengujian Asumsi Residual Kekasaran Permukaan

4.5.1.1 Uji Identik

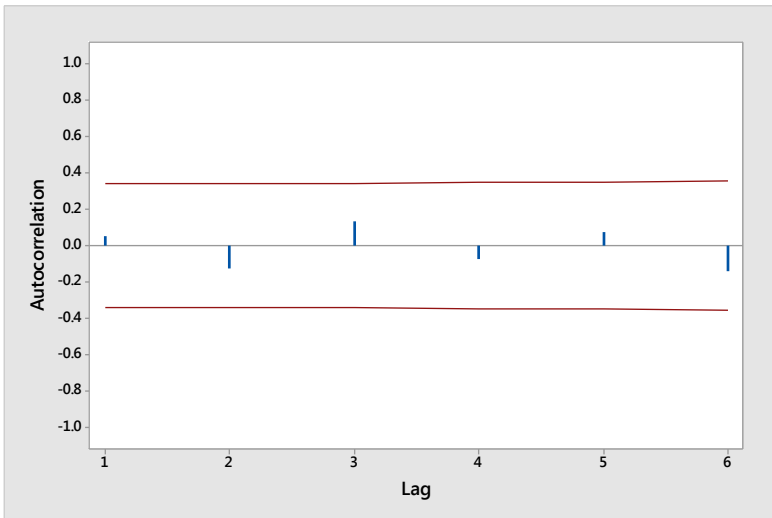
Gambar 4.20 menunjukkan bahwa residual tersebar secara acak dan tidak membentuk pola tertentu. Dengan demikian asumsi residual identik terpenuhi.



Gambar 4.20 Plot residual kekasaran permukaan *versus* *order*

4.5.1.2 Uji Independen

Pengujian independen pada penelitian ini dilakukan dengan menggunakan *auto correlation function* (ACF). Berdasarkan plot ACF yang ditunjukkan pada Gambar 4.21, tidak ada nilai ACF pada setiap *lag* yang keluar dari batas interval. Hal ini membuktikan bahwa tidak ada korelasi antara residual yang artinya residual bersifat independen.



Gambar 4.21 Plot ACF pada respon kekasaran permukaan

4.5.1.3 Uji Kenormalan

Uji kenormalan residual dilakukan dengan menggunakan uji Kolmogorov-Smirnov. Hipotesis yang digunakan adalah:

H_0 : Residual berdistribusi normal

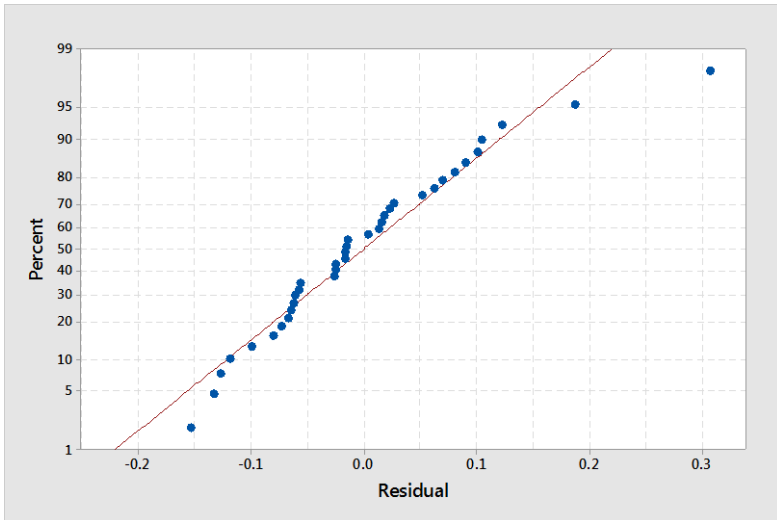
H_1 : Residual tidak berdistribusi normal

H_0 ditolak jika *p-value* lebih kecil dari pada $\alpha = 0,05$.

Gambar 4.22 menunjukkan bahwa dengan uji Kolmogorov-Smirnov diperoleh:

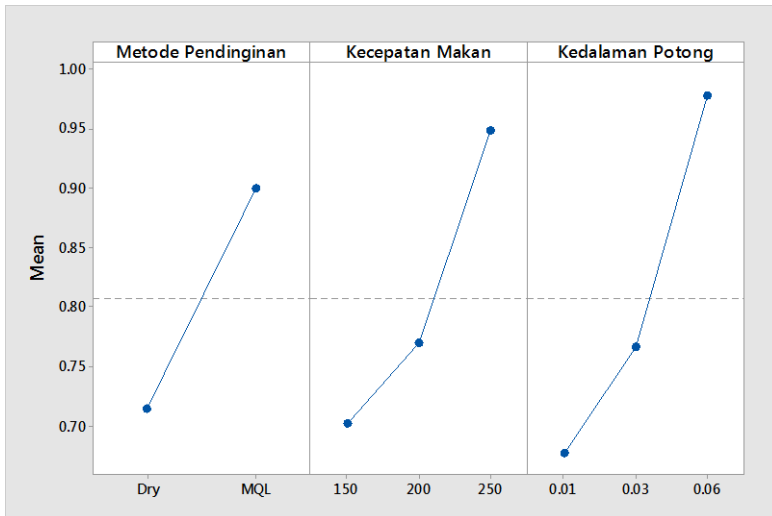
- *P-value* bernilai $>0,150$ yang berarti lebih besar dari $\alpha = 0,05$. Oleh karena itu dapat disimpulkan bahwa H_0 gagal ditolak atau residual berdistribusi normal.
- *Mean* bernilai sebesar $1,171902 \times 10^{-16}$ yang berarti sangat kecil atau mendekati nol.
- Variansi di residual adalah sebesar $0,106^2 = 0,011236$

Dengan demikian asumsi residual berdistribusi normal dengan nilai *mean* sama dengan nol (atau mendekati nol) dan memiliki variansi tertentu (sebesar 0,011236) telah terpenuhi.



Gambar 4.22 Plot uji distribusi normal pada respon kekasaran permukaan

Secara grafik, hubungan antara variabel metode pendinginan, kecepatan makan dan kedalaman potong pada proses gerinda permukaan terhadap respon kekasaran permukaan ditunjukkan pada Gambar 4.17.



Gambar 4.23 Grafik pengaruh metode pendinginan, kecepatan makan dan kedalaman potong terhadap kekasaran permukaan

Gambar 4.23 menunjukkan bahwa metode pendinginan menghasilkan kekasaran permukaan yang berbeda, yaitu proses gerinda permukaan yang menggunakan MQL mempunyai kekasaran permukaan yang lebih tinggi, serta peningkatan kecepatan makan dan kedalaman potong akan menghasilkan kekasaran permukaan yang lebih tinggi. Nilai kekasaran permukaan yang terendah terjadi pada kombinasi pendinginan *dry*, kecepatan makan 150 mm/s dan kedalaman potong 0,01 mm yaitu sebesar 0,56 μm . Nilai kekasaran permukaan yang tertinggi terjadi pada kombinasi pendinginan MQL, kecepatan makan 250 mm/s dan kedalaman potong 0,06 mm yaitu sebesar 1,46 μm .

Pada proses gerinda, penggunaan MQL akan melumasi sekitar daerah penggerindaan yang akan menimbulkan efek *slipping*. Karena efek ini beberapa butiran yang kecil yang seharusnya bisa memotong benda kerja, menjadi tidak bisa memotong benda kerja tersebut. Hal ini menghasilkan *uncut chip* dipermukaan benda kerja lebih banyak yang mengakibatkan kekasaran permukaan lebih tinggi pada saat menggunakan MQL dari pada *dry*.

Hasil analisis data eksperimen, secara statistik menunjukkan bahwa semakin besar kedalaman potong, maka kekasaran permukaan benda kerja akan naik. Kedalaman potong yang kecil membuat butiran abrasif pada permukaan batu gerinda sedikit bergesekan dengan benda kerja. Gesekan yang sedikit ini menyebabkan permukaan hasil penggerindaan mempunyai celah yang sempit, sehingga kekasaran permukaan benda kerja juga rendah. Akan tetapi, dengan kedalaman potong yang besar, maka butiran abrasif yang terdapat di permukaan roda gerinda akan lebih banyak bergesekan dengan benda kerja, sehingga menyebabkan permukaan hasil penggerindaan mempunyai celah yang lebar. Hal ini menyebabkan kekasaran permukaan semakin tinggi.

4.6 Pemodelan Matematis Untuk Kekasaran Permukaan

Hasil regresi untuk kekasaran permukaan dengan menggunakan Minitab dapat dilihat pada tabel 4.21 dan 4.22 sebagai berikut:

Tabel 4.21 Hasil ANAVA untuk kekasaran permukaan

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Regression	2	0.172056	0.086028	32.26	0.000
Kecepatan Makan	1	0.062062	0.062062	23.27	0.000
Kedalaman Potong	1	0.109994	0.109994	41.25	0.000
Error	15	0.039999	0.002667		
Total	17	0.212055			

Tabel 4.22 Koefisien regresi untuk model kekasaran permukaan

Predictor	Coef	SE Coef	T	P
Constant	-1.156	0.313	-3.69	0.002
Kecepatan Makan	0.647	0.134	4.82	0.000
Kedalaman Potong	0.2240	0.0380	6.42	0.000
S = 0.0516389 R-Sq = 81.14% R-Sq(adj) = 78.62%				

4.6.1 Uji Regresi

4.6.1.1 Uji Koefisien Regresi Secara Serempak

Hipotesis untuk uji koefisien regresi secara serempak dari kekasaran permukaan adalah sebagai berikut:

H_0 : Semua β_1 tidak mempunyai pengaruh terhadap kekasaran permukaan.

H_1 : Paling tidak ada satu dari β_1 mempunyai pengaruh terhadap kekasaran permukaan.

Dari tabel 4.21 terlihat bahwa pada pengujian dengan $\alpha = 0.05$, *p-value* dari regresi sama dengan nol yaitu lebih kecil dari 0.05, sehingga H_0 ditolak. Ini berarti bahwa model dapat diterima secara statistik dan telah mewakili data.

4.6.1.2 Uji Koefisien Regresi Secara Individu

Hipotesis untuk uji koefisien regresi secara individu dari kekasaran permukaan adalah sebagai berikut:

$H_0: \beta_1 = 0$ untuk setiap i .

$H_1: \beta_1 \neq 0$ untuk setiap i .

Dari tabel 4.22 menunjukkan bahwa pada pengujian dengan $\alpha = 0.05$, p -value untuk kecepatan makan, dan kedalaman potong lebih kecil dari 0.05 yang berarti H_0 ditolak. Dengan demikian koefisien kecepatan makan adalah sebesar 0,647 dan koefisien kedalaman potong adalah sebesar 0,2240.

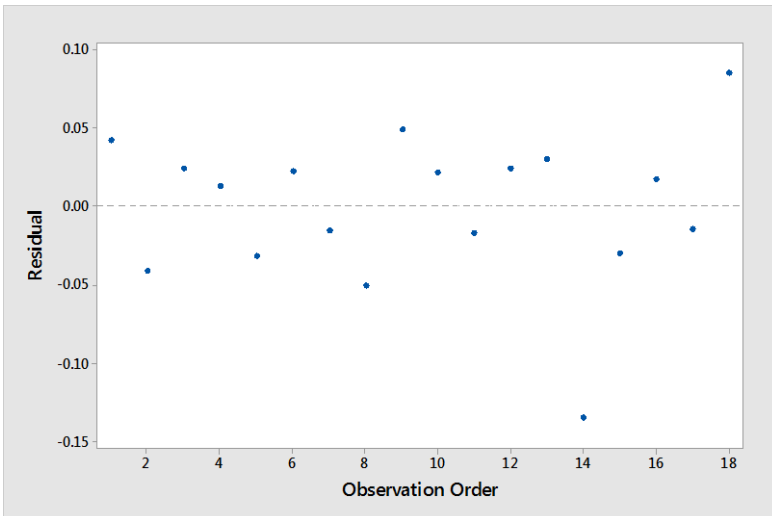
4.6.1.3 Uji Koefisien Determinasi (R^2)

Dari tabel 4.22 menunjukkan bahwa R^2 untuk persamaan regresi kekasaran permukaan adalah 81.14%, artinya menunjukkan bahwa 81.14% variasi pada Y diterangkan oleh model regresi linier yang digunakan.

4.6.2 Uji Asumsi Residual

4.6.2.1 Uji Identik

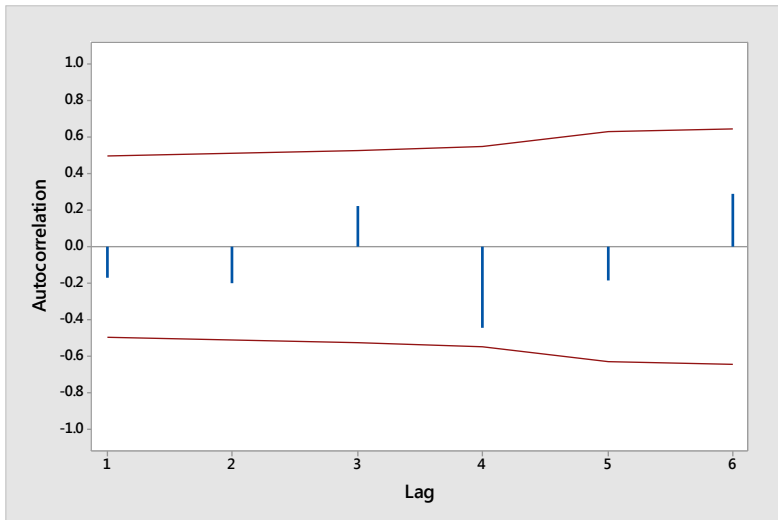
Gambar 4.24 menunjukkan bahwa residual tersebar secara acak dan tidak membentuk pola tertentu. Dengan demikian asumsi residual identik terpenuhi.



Gambar 4.24 Plot residual kekasaran permukaan *versus* *order*

4.6.2.2 Uji Independen

Pengujian independen pada penelitian ini dilakukan dengan menggunakan *auto correlation function* (ACF). Berdasarkan plot ACF yang ditunjukkan pada Gambar 4.25, tidak ada nilai ACF pada setiap *lag* yang keluar dari batas interval. Hal ini membuktikan bahwa tidak ada korelasi antara residual, yang artinya residual bersifat independen.



Gambar 4.25 Plot ACF pada respon kekasaran permukaan

4.6.2.3 Uji Kenormalan

Uji kenormalan residual dilakukan dengan menggunakan uji Kolmogorov-Smirnov. Hipotesis yang digunakan adalah:

H_0 : Residual berdistribusi normal

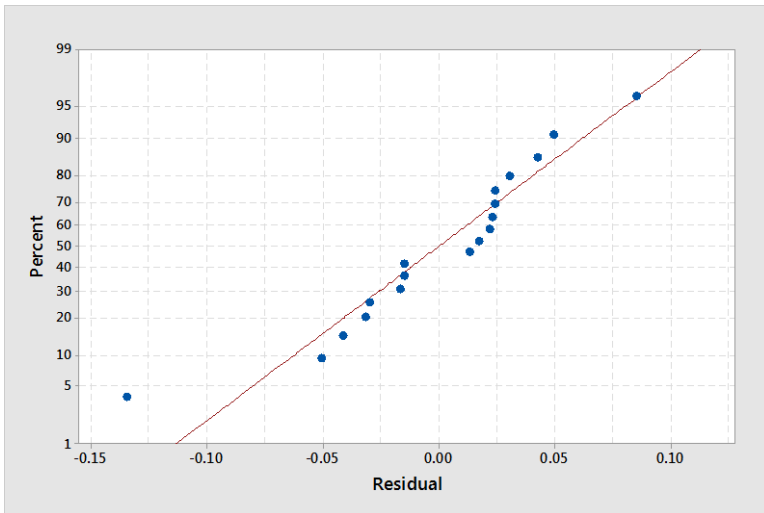
H_1 : Residual tidak berdistribusi normal

H_0 ditolak jika *p-value* lebih kecil dari pada $\alpha = 0.05$.

Gambar 4.26 menunjukkan bahwa dengan uji Kolmogorov-Smirnov diperoleh:

- *P-value* bernilai >0.150 yang berarti lebih besar dari $\alpha = 0.05$. Oleh karena itu dapat disimpulkan bahwa H_0 gagal ditolak atau residual berdistribusi normal.
- *Mean* bernilai sebesar 1.033124×10^{-16} yang berarti sangat kecil atau mendekati nol.
- Variansi di residual adalah sebesar $0.162^2 = 0.026244$

Dengan demikian asumsi residual berdistribusi normal dengan nilai *mean* sama dengan nol (atau mendekati nol) dan memiliki variansi tertentu (sebesar 0.026244) telah terpenuhi.



Gambar 4.26 Plot uji distribusi normal pada respon kekasaran permukaan

Koefisien regresi hasil perhitungan dapat digunakan untuk membuat model regresi sebagai berikut:

$$\text{Log Kekasaran Permukaan} = -1.156 + 0.647 \text{ Log Kecepatan Makan} + 0.2440 \text{ Log Kedalaman Potong}$$

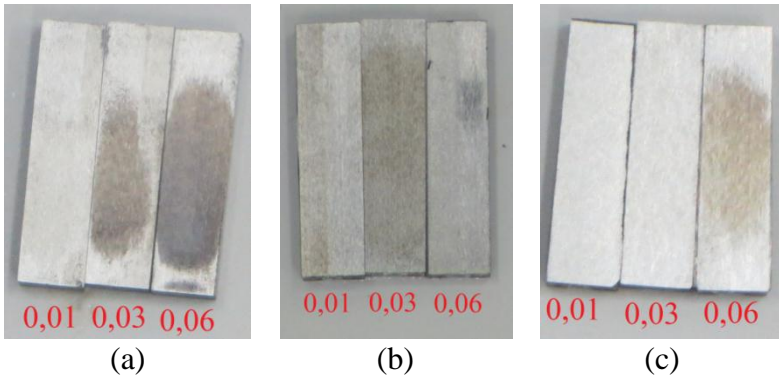
atau

$$\text{Kekasaran Permukaan} = 0.0698232 \times \text{Kecepatan Makan}^{0.647} \times \text{Kedalaman Makan}^{0.2440}$$

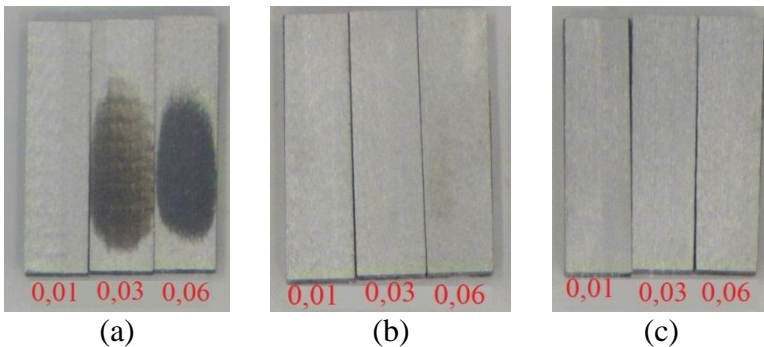
4.7 Pengaruh Variabel Proses Terhadap *Surface Burning*

Surface burning merupakan salah satu jenis dari kerusakan termal yang terjadi selama proses gerinda permukaan. Hal ini terjadi pada area dimana adanya gesekan antara roda gerinda dengan permukaan benda kerja, sehingga pada area ini terjadi kenaikan temperatur yang sangat tinggi. Pengamatan *surface burning* pada setiap benda kerja dilakukan secara visual dengan pencahayaan yang cukup. Gambar 4.27 dan Gambar 4.28 menunjukkan derajat *burning* yang terjadi pada proses gerinda permukaan. Proses gerinda permukaan tiap spesimen dilakukan dengan pemakanan sebanyak lima kali.

Surface burning pada permukaan benda kerja ditandai dengan perubahan warna dari permukaan benda kerja hasil proses gerinda. Secara visual terjadi perubahan warna yang berangsur-angsur dari warna coklat ke warna coklat pekat dan akhirnya menjadi warna biru kemerah-merahan. Perubahan warna ini merupakan indikator bahwa kerusakan termal telah terjadi dan jika tidak dikendalikan dengan benar maka akan terjadi kerusakan permukaan yang lebih lanjut.



Gambar 4.27 *Surface burning* pada proses gerinda permukaan dengan metode pendinginan *dry*, (a) kecepatan makan 150 mm/s, (b) kecepatan makan 200 mm/s, (c) kecepatan makan 250 mm/s.



Gambar 4.28 *Surface burning* pada proses gerinda permukaan dengan metode pendinginan MQL, (a) kecepatan makan 150 mm/s, (b) kecepatan makan 200 mm/s, (c) kecepatan makan 250mm/s.

Pada penelitian ini derajat *burning* diklasifikasikan pada Tabel 4.23 dan data derajat *burning* hasil eksperimen ditunjukkan pada Tabel 4.24.

Tabel 4.23 Klasifikasi derajat *burning*.

Derajat <i>Burning</i>	Simbol	Pengertian
<i>No Burning</i>	N	<ul style="list-style-type: none"> • Tidak terjadi <i>burning</i> pada spesimen.
<i>Light</i>	L	<ul style="list-style-type: none"> • <i>Burning</i> terjadi pada sebagian kecil spesimen • Kuantitas <i>burning</i> kurang dari $\frac{1}{4}$ bagian spesimen • Warna sedikit kecoklatan
	L1	<ul style="list-style-type: none"> • <i>Burning</i> terjadi pada sebagian kecil spesimen • Kuantitas <i>burning</i> kurang dari $\frac{1}{2}$ bagian spesimen • Warna sedikit kecoklatan
<i>Medium</i>	M	<ul style="list-style-type: none"> • <i>Burning</i> terjadi pada sebagian kecil spesimen • Kuantitas <i>burning</i> lebih dari $\frac{1}{4}$ dan kurang dari $\frac{1}{2}$ bagian spesimen • Warna coklat lebih pekat dibandingkan <i>light</i>
<i>Severe</i>	S	<ul style="list-style-type: none"> • <i>Burning</i> terjadi pada $\frac{1}{2}$ sampai $\frac{1}{4}$ bagian spesimen • Warna biru kemerah merahan
	S1	<ul style="list-style-type: none"> • <i>Burning</i> terjadi pada $\frac{3}{4}$ sampai seluruh bagian spesimen • Warna biru kemerah merahan

Tabel 4.24 Data derajat *burning* hasil eksperimen

Variabel Proses			Variabel Respon
Pendinginan	Kecepatan Makan	Kedalaman Potong	<i>Surface Burning</i>
Dry	150	0.01	N
		0.03	L1
		0.06	S1
	200	0.01	N
		0.03	L1
		0.06	M
	250	0.01	N
		0.03	N
		0.06	L1
MQL	150	0.01	N
		0.03	L1
		0.06	S
	200	0.01	N
		0.03	N
		0.06	L
	250	0.01	N
		0.03	N
		0.06	N

Dari hasil percobaan dapat disimpulkan bahwa kedalaman potong sangat berpengaruh terhadap terjadinya *surface burning*. Semakin besar kedalaman potong, maka derajat *burning* juga meningkat. Hal ini ditunjukkan oleh Gambar 4.27 (a) dan Gambar 4.28 (a). Kedalaman potong yang kecil membuat butiran abrasif yang terdapat di

permukaan roda gerinda sedikit bergesekan dengan benda kerja. Gesekan yang sedikit ini menyebabkan temperatur yang rendah, sehingga derajat *burning* juga rendah. Akan tetapi, dengan pemakaian kedalaman potong yang besar, maka butiran abrasif yang terdapat di permukaan roda gerinda akan lebih banyak bergesekan dengan benda kerja. Sebagai akibatnya temperatur naik sangat tinggi, sehingga derajat *burning* menjadi semakin meningkat juga.

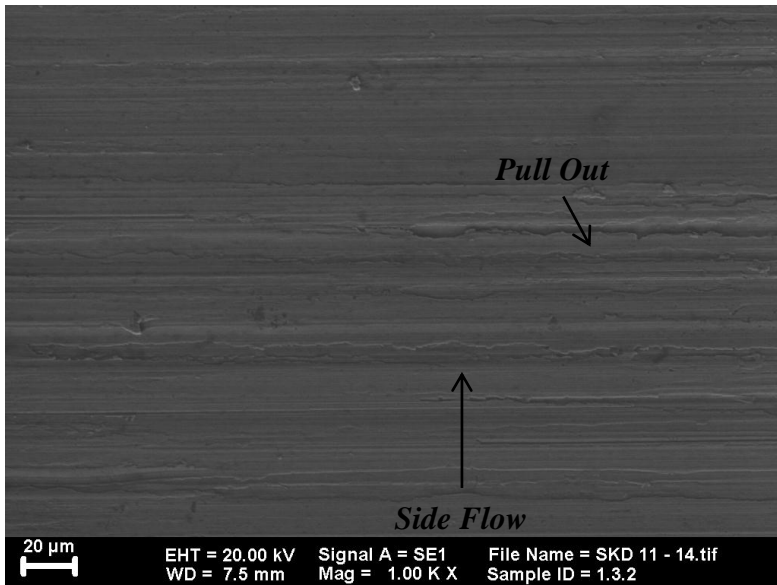
Variabel proses kedua yang berpengaruh pada *surface burning* adalah kecepatan makan. Hal ini ditunjukkan pada Gambar 4.27 (a), (b), (c), dan pada Gambar 4.28 (a), (b), (c). Semakin tinggi kecepatan makan, maka derajat *burning* semakin berkurang, karena waktu kontak pada saat gesekan yang terjadi antara roda gerinda dengan benda kerja semakin singkat, sehingga tidak cukup waktu untuk timbulnya temperatur yang tinggi.

Metode pendinginan juga berpengaruh terhadap *surface burning*. Penggunaan MQL sedikit dapat mengatasi masalah *surface burning* dibandingkan dengan *dry*. MQL dapat menurunkan gaya tangensial pada saat proses penggerindaan. Turunnya gaya tangensial mengakibatkan temperatur pada daerah penggerindaan juga turun, sehingga derajat *burning* menjadi rendah. MQL juga menurunkan temperatur yang dihasilkan ketika proses gerinda berlangsung dengan konveksi dari *aerosol* yang berevaporasi dan semburan udara bertekanan.

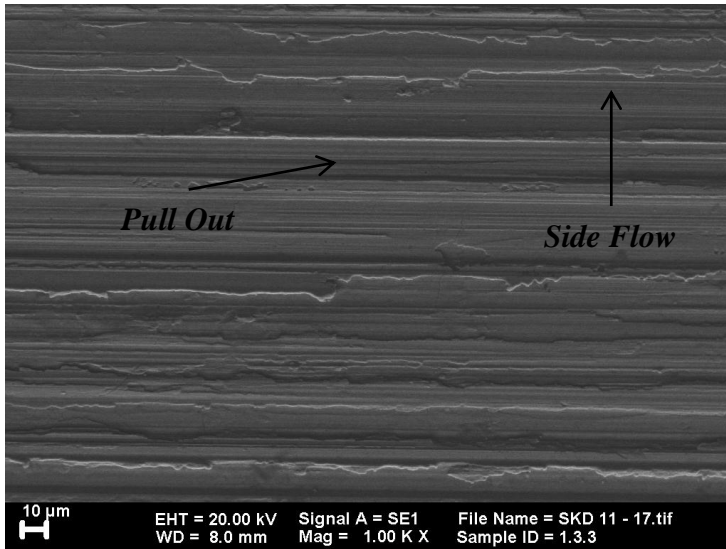
4.8 Pengaruh Variabel Proses Terhadap Morfologi Permukaan Benda Kerja

Pengamatan benda kerja dengan menggunakan SEM dilakukan untuk menganalisa morfologi dari permukaan benda kerja yang dihasilkan pada proses gerinda permukaan. Foto hasil penggerindaan diamati dengan pembesaran 1000x.

Pengambilan SEM dilakukan hanya pada kecepatan makan 250 mm/s dengan kedalaman makan 0,03 mm dan 0,06 mm. Gambar 4.29 dan 4.30 menunjukkan morfologi permukaan benda kerja hasil proses gerinda permukaan kering pada kecepatan makan 250 mm/s.



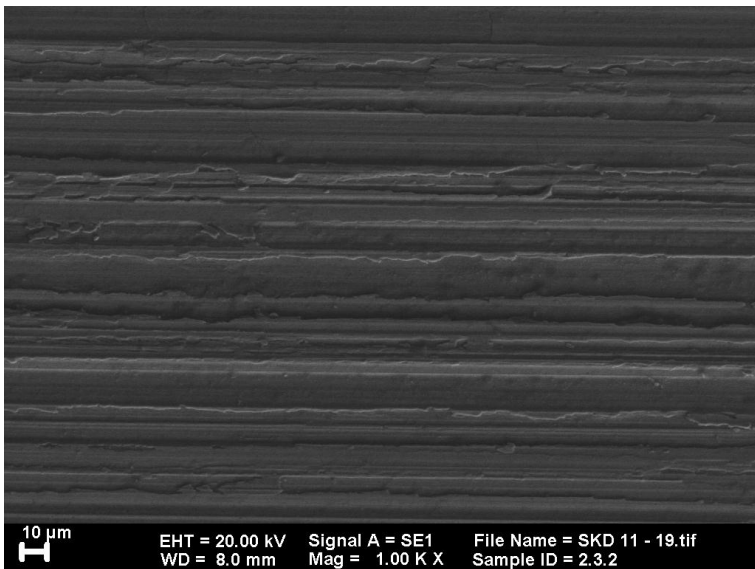
Gambar 4.29 Foto morfologi permukaan benda kerja dengan pendinginan *dry*, kecepatan makan 250 mm/s dan kedalaman potong 0,03 mm.



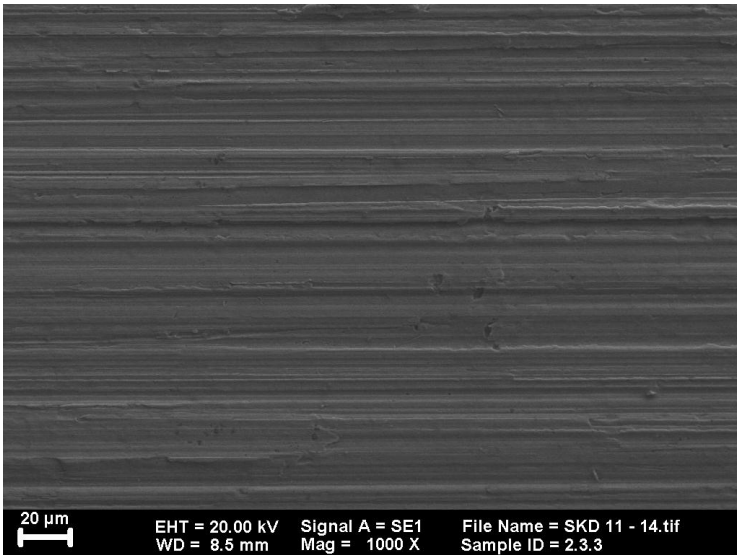
Gambar 4.30 Foto morfologi permukaan benda kerja dengan pendinginan *dry*, kecepatan makan 250 mm/s dan kedalaman potong 0,06 mm.

Pada Gambar 4.29 dan 4.30 terlihat bahwa permukaan benda kerja mengalami cacat seperti *side flow* dan *grain pull-out* yang mengindikasikan kurangnya lubrikasi dan gesekan yang parah dari butiran-butiran abrasif yang sudah aus. Cacat ini juga mengindikasikan bahwa *ploughing* menjadi salah satu mode pembentukan geram yang mendominasi pada proses gerinda permukaan ini. Permukaan benda kerja yang dihasilkan oleh penggerindaan dengan menggunakan MQL menunjukkan bahwa cacat seperti *side flow* dan *grain pull-out* berkurang. Berkurangnya cacat ini menunjukkan bahwa penggunaan MQL mampu melumasi benda kerja pada saat proses penggerindaan, dan *cutting* menjadi salah satu mode

pembentukan geram yang mendominasi pada proses penggerindaan ini. Penelitian pada proses gerinda dengan menggunakan MQL yang telah dilakukan oleh Sadeghi dkk (2010) juga menunjukkan hasil yang sama. Gambar 4.31 dan 4.32 menunjukkan morfologi permukaan benda kerja hasil proses gerinda permukaan dengan MQL pada kecepatan makan 250 mm/s.



Gambar 4.31 Foto morfologi permukaan benda kerja dengan pendinginan MQL, kecepatan makan 250 mm/s dan kedalaman potong 0,03 mm.



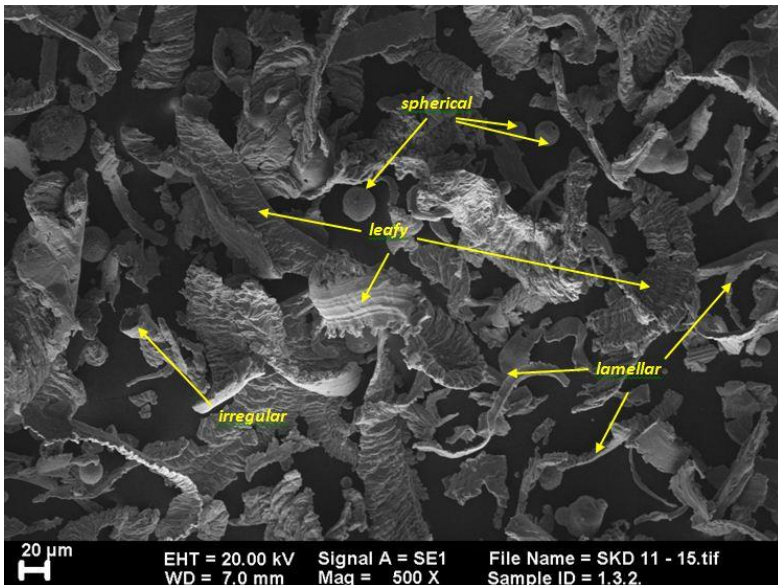
Gambar 4.32 Foto morfologi permukaan benda kerja dengan pendinginan MQL, kecepatan makan 250 mm/s dan kedalaman potong 0,06 mm.

Gambar 4.31 dan Gambar 4.32 juga menunjukkan bahwa pada penggerindaan dengan menggunakan MQL menghasilkan permukaan benda kerja yang memiliki banyak *ridges* yang tajam. *Cutting fluid* yang digunakan pada MQL menjaga agar butiran abrasif tetap tajam, sehingga jumlah *ridges* yang terbentuk meningkat dan tajam. Penambahan jumlah *ridges* akan meningkatkan kekasaran permukaan.

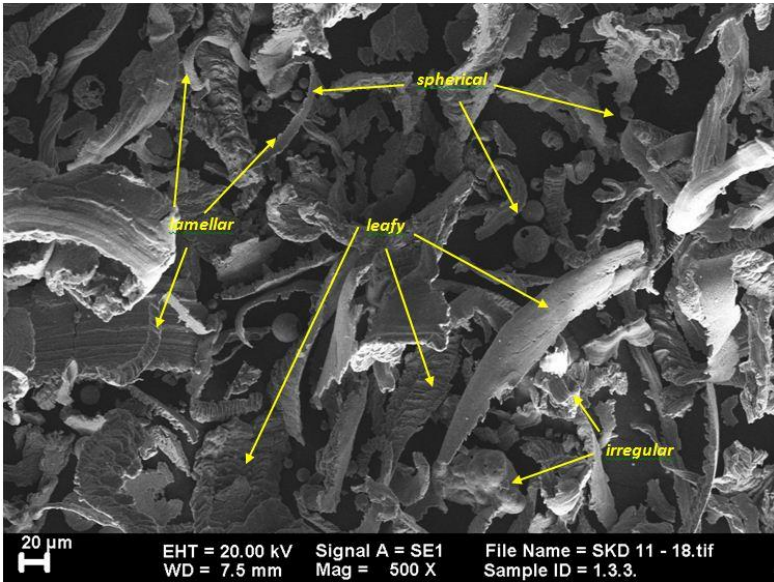
4.9 Pengaruh Variabel Proses Terhadap Bentuk Geram

Pengamatan bentuk geram dilakukan dengan menggunakan SEM untuk mengetahui morfologi bentuk geram yang dihasilkan dari proses gerinda permukaan.

Pengamatan SEM untuk bentuk geram dilakukan dengan pembesaran 500x. Pengambilan foto SEM untuk bentuk geram dilakukan hanya pada kecepatan makan 250 mm/s dengan kedalaman makan 0,03 mm dan 0,06 mm. Gambar 4.33 dan 4.34 menunjukkan bentuk geram hasil proses gerinda permukaan kering (*dry*).



Gambar 4.33 Foto SEM geram dengan metode pendinginan *dry*, kecepatan makan 250 mm/s dan kedalaman potong 0,03 mm.

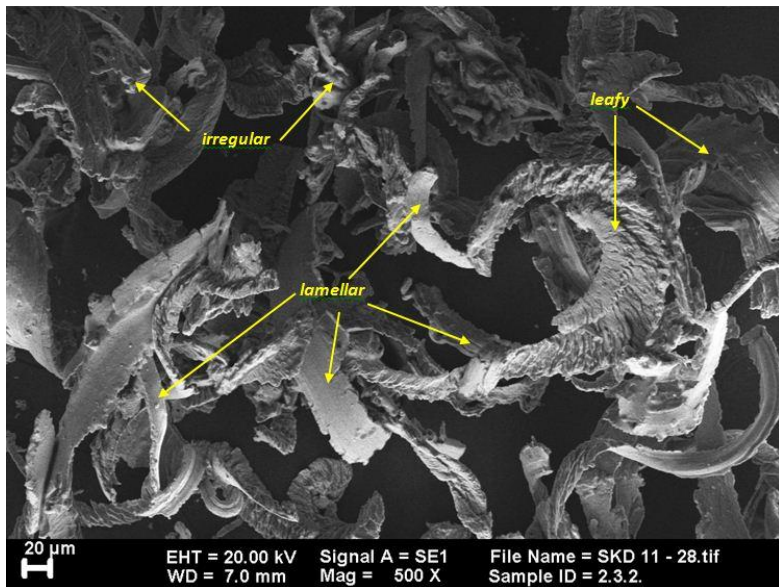


Gambar 4.34 Foto SEM geram dengan metode pendinginan *dry*, kecepatan makan 250 mm/s dan kedalaman potong 0,06 mm.

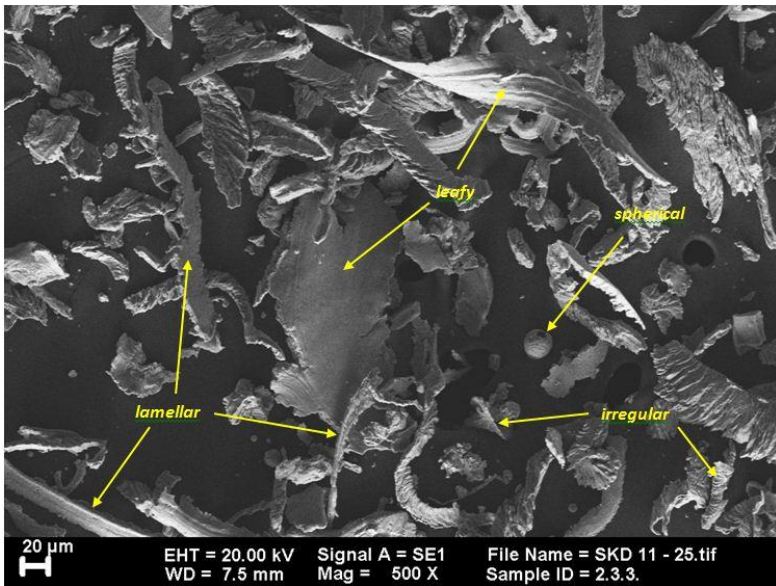
Gambar 4.33 menunjukkan bahwa pada kedalaman potong sebesar 0,03 mm bentuk geram didominasi oleh bentuk *leafy*, *lamellar*, *irregular* dan *spherical*. Bentuk *lamellar* mengindikasikan bahwa *cutting* menjadi salah satu mode pembentukan geram yang terjadi pada proses gerinda permukaan. Bentuk *leafy* menunjukkan adanya proses *ploughing* pada proses gerinda permukaan. Geram dengan bentuk *spherical* terjadi karena adanya pemanasan yang berlebih dan oksidasi eksotermis (Dhar dkk., 2005). Gambar 4.34 menunjukkan hasil geram pada kedalaman potong 0,06 mm. Bentuk geram yang dihasilkan sama dengan bentuk geram yang dihasilkan pada kedalaman potong 0,03 mm, akan tetapi dengan bentuk *irregular* dan *spherical* yang

lebih banyak. Bertambahnya bentuk *spherical* menunjukkan pada kedalaman potong 0,06 mm terjadi kenaikan temperatur yang lebih tinggi dibandingkan dengan 0,03 mm.

Penggunaan MQL terbukti menurunkan temperatur proses gerinda permukaan. Hal ini bisa dilihat pada Gambar 4.35 dimana geram didominasi oleh bentuk *lamellar*, *leafy*, dan *irregular*. Tidak adanya bentuk *spherical* mengindikasikan tidak adanya temperatur yang berlebihan selama proses gerinda permukaan berlangsung. Gambar 4.36 menunjukkan bahwa pada kedalaman potong 0,06 mm bentuk geram didominasi oleh bentuk *lamellar*, *leafy*, *irregular* dan *spherical*. Munculnya bentuk *spherical* mengindikasikan adanya pemanasan yang berlebih pada saat proses gerinda. Pada proses gerinda permukaan kering terlihat bahwa geram dengan bentuk *lamellar* terlihat lebih lebar dibandingkan dengan proses gerinda permukaan yang menggunakan MQL. Bertambahnya lebar geram menunjukkan adanya proses *ploughing*. Pada proses gerinda permukaan yang menggunakan MQL terlihat adanya geram yang berupa patahan kecil-kecil. Hal ini menunjukkan *fracturing* merupakan salah satu mode pembentukan geram yang terjadi. Berdasarkan bentuk geram yang telah dianalisa bisa dilihat bahwa pada penggerindaan kering mode pembentukan geram didominasi oleh *cutting*, *ploughing*, dan *rubbing*, sedangkan pada penggerindaan yang menggunakan MQL mode pembentukan geram didominasi oleh *cutting*, *fracturing* dan *ploughing*.



Gambar 4.35 Foto SEM geram dengan metode pendinginan MQL, kecepatan makan 250 mm/s dan kedalaman potong 0,03 mm.



Gambar 4.36 Foto SEM geram dengan metode pendinginan MQL, kecepatan makan 250 mm/s dan kedalaman potong 0,06 mm.

4.10 Diskusi dan Pembahasan

Berdasarkan hasil eksperimen dan analisis yang telah dilakukan pada penelitian ini, maka pengaruh-pengaruh dari variabel proses terhadap variabel respon adalah sebagai berikut:

- a. Hasil dari penelitian ini menunjukkan bahwa metode pendinginan mempunyai pengaruh yang signifikan terhadap gaya tangensial, gaya normal dan kekasaran permukaan. Penggunaan MQL menurunkan gaya tangensial dan gaya normal yang terjadi pada saat proses penggerindaan. Turunnya gaya tangensial bisa disebabkan karena MQL berfungsi sebagai pelumas, sehingga dapat

menurunkan gaya yang terjadi pada saat proses penggerindaan. Tawakoli dkk. (2009), Bianchi dkk. (2010), dan Sadeghi dkk. (2010) juga meneliti tentang pengaruh penggunaan MQL terhadap proses gerinda permukaan, dimana pada ketiga penelitian tersebut menunjukkan hasil yang sama.

Pada penelitian ini penggunaan MQL pada proses gerinda permukaan juga menyebabkan kekasaran permukaan semakin tinggi. Kekasaran permukaan yang tinggi ini disebabkan karena penggunaan MQL akan menjaga butiran abrasif tetap tajam sehingga *rubbing* berkurang. Butiran abrasif yang tajam ini akan meninggalkan *ridges* yang tinggi yang menghasilkan kekasaran permukaan yang tinggi. Penurunan gaya tangensial dan gaya normal mengakibatkan temperatur pada daerah penggerindaan turun, sehingga derajat *burning* menjadi rendah.

Penggunaan MQL pada proses gerinda permukaan juga menghasilkan geram yang didominasi oleh bentuk *lamellar*, *leafy*, *irregular* dan juga geram dengan bentuk patahan-patahan kecil. Bentuk-bentuk geram ini mengindikasikan bahwa pada proses penggerindaan dengan menggunakan MQL mode pembentukan geram didominasi oleh *cutting*, *fracturing*, dan *ploughing*. Pada proses gerinda permukaan kering geram yang dihasilkan berbentuk *leafy*, *lamellar*, *irregular* dan *spherical*. Bentuk-bentuk geram ini mengindikasikan bahwa pada proses penggerindaan kering mode pembentukan geram didominasi oleh *ploughing*, *cutting* dan *rubbing*.

- b. Pada penelitian ini kecepatan makan mempunyai pengaruh yang signifikan terhadap gaya tangensial, gaya normal dan kekasaran permukaan. Kecepatan makan yang tinggi menyebabkan gaya tangensial dan gaya normal yang terjadi pada saat proses penggerindaan menjadi besar. Penelitian pada proses gerinda dengan menggunakan MQL dan variabel proses kecepatan makan yang telah dilakukan oleh Tawakoli dkk. (2010) menunjukkan hasil yang sama. Penggunaan kecepatan makan yang tinggi juga menyebabkan kekasaran permukaan menjadi tinggi. Hasil yang sama juga ditunjukkan oleh Sadeghi dkk. (2010) yang meneliti tentang proses gerinda permukaan dengan menggunakan MQL dan variabel proses kecepatan makan.

Pada proses gerinda gerinda permukaan dengan menggunakan MQL, hasil pemodelan gaya tangensial (F_y), gaya normal (F_z) dan kekasaran permukaan menunjukkan pengaruh dari kecepatan makan lebih kecil daripada pengaruh kedalaman potong. Penggunaan kecepatan makan yang tinggi akan mengakibatkan derajat *burning* juga berkurang. Hal ini dikarenakan waktu kontak yang terjadi antara roda gerinda dengan benda kerja semakin singkat, sehingga sebagian besar kalor yang dihasilkan tidak merambat ke benda kerja maupun ke roda gerinda melainkan dibawa oleh geram.

- c. Hasil dari penelitian ini menunjukkan bahwa kedalaman potong mempunyai pengaruh yang signifikan terhadap gaya tangensial, gaya normal dan kekasaran permukaan. Kedalaman potong yang tinggi menyebabkan gaya tangensial dan gaya

normal yang terjadi pada saat proses penggerindaan menjadi besar. Hasil yang sama juga ditunjukkan oleh Tawakoli dkk. (2009), Bianchi dkk. (2010) dan Sadeghi dkk. (2010) yang meneliti tentang proses gerinda permukaan dengan menggunakan MQL dan variabel proses kedalaman potong. Peningkatan gaya tangensial disebabkan oleh bidang geser yang bertambah lebar. Hal ini juga dinyatakan pada teori yang bisa dilihat pada rumus (2.2). Semakin tinggi kedalaman potong kekasaran permukaan juga akan semakin tinggi. Penelitian pada proses gerinda permukaan dengan menggunakan MQL yang telah dilakukan oleh Tawakoli dkk. (2009), Bianchi dkk. (2010) dan Sadeghi dkk. (2010) juga menunjukkan hasil yang sama. Peningkatan kekasaran permukaan disebabkan karena pada kondisi ini butiran abrasif yang terdapat di permukaan roda gerinda akan lebih banyak bergesekan dengan benda kerja. Hal ini menyebabkan permukaan hasil penggerindaan mempunyai celah yang lebar. Selain itu kedalaman potong yang tinggi menyebabkan butiran abrasif lebih banyak bergesekan dengan benda kerja sehingga temperatur daerah penggerindaan meningkat, dan mengakibatkan derajat *burning* yang lebih tinggi.

BAB 5

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil eksperimen dan analisis yang telah dilakukan untuk mengetahui pengaruh metode pendinginan MQL dan variabel-variabel proses gerinda permukaan yaitu kecepatan makan (150 mm/s, 200 mm/s, 250 mm/s) dan kedalaman potong (0.01 mm, 0.03 mm, 0.06 mm) terhadap gaya tangensial, gaya normal, IPBK dan mode pembentukan geram pada proses gerinda permukaan baja perkakas SKD 11, maka dapat diambil kesimpulan sebagai berikut:

1. Proses gerinda permukaan dengan menggunakan MQL akan menghasilkan gaya tangensial dan gaya normal yang lebih rendah, kekasaran permukaan yang lebih tinggi dan derajat *burning* yang lebih rendah jika dibandingkan dengan dengan proses gerinda kering.
2. Peningkatan kecepatan makan pada proses gerinda permukaan dengan menggunakan MQL maupun *dry* akan menyebabkan peningkatan gaya tangensial, gaya normal dan kekasaran permukaan yang lebih tinggi, tetapi akan menyebabkan penurunan dari derajat *burning*.
3. Peningkatan kedalaman potong pada proses gerinda permukaan dengan menggunakan MQL maupun *dry* akan menyebabkan peningkatan gaya tangensial, gaya normal, kekasaran permukaan dan derajat *burning*.

4. Benda kerja yang menggunakan MQL menunjukkan bahwa cacat permukaan seperti *side flow* dan *grain pull-out* yang timbul pada proses penggerindaan kering berkurang. Berkurangnya cacat ini menunjukkan *cutting* menjadi salah satu mode pembentukan geram yang mendominasi pada proses penggerindaan ini.
5. Penggunaan MQL pada proses gerinda permukaan menghasilkan bentuk geram seperti *lamellar*, *leafy*, *irregular* dan juga geram dengan bentuk patahan-patahan kecil. Bentuk-bentuk geram ini mengindikasikan bahwa pada proses penggerindaan dengan menggunakan MQL mode pembentukan geram didominasi oleh *cutting*, *fracturing*, dan *ploughing*. Proses gerinda kering menghasilkan geram dengan bentuk *leafy*, *lamellar*, *irregular* dan *spherical*. Bentuk-bentuk geram ini mengindikasikan bahwa pada proses penggerindaan kering mode pembentukan geram didominasi oleh *ploughing*, *cutting* dan *rubbing*.

5.2 Saran

Untuk melengkapi penelitian yang telah dilakukan ini, disarankan untuk melakukan pengukuran temperatur, hal ini dilakukan agar bisa melihat seberapa besar pendinginan yang dapat diturunkan oleh MQL secara kuantitatif. Adapun variabel proses lain yang berhubungan dengan MQL yang bisa dilakukan diantaranya adalah jenis *cutting fluid*, jarak *nozzle* terhadap ujung pahat dan benda kerja dan MQL *flow rate*.

DAFTAR PUSTAKA

- Bhattacharyya, G.K. dan Johnson, R.A., 1997, *Statistical Concepts and Methods*, John Wiley & Sons, Inc., America.
- Braga, D.U., Diniz, A.E., Miranda, G.W.A., Coppini, N.L., 2002, "Using a Minimum Quantity of Lubricant (MQL) and A Diamond Coated Tool in The Drilling of Aluminum-Silicon Alloys," *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 122, pp. 127-138.
- Dhar, N.R., Hossain, M., Kamruzzaman, M., 2005, "MQL Applications in Grinding of 16MnCr5 Steel a Comparison With Wet and Dry Grinding," *International Conference on Mechanical Engineering*.
- Datasheet e 216, 2014, "surface finishes," www.finetubes.co.uk, diakses tanggal : 7 Mei 2016.
- Iriawan, N. dan Astuti, S.P., 2006, *Mengolah Data Statistik Dengan Mudah Menggunakan Minitab 14*, Edisi I, Amd Offset, Yogyakarta.
- Klocke, F., 2011, *Manufacturing Processes 1*, RWTH edition, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg.
- Leonardo, R.S., Eduardo, C.B., Ronaldo, Y.F., Rodrigo, E.C., Thiago, V.F., Paulo R.A., 2006, "Analysis of surface integrity for minimum quantity lubricant-MQL in grinding," *International Journal of Machine Tool & Manufacture*, pp. 1-7.

- Montgomery, D.C., 1991, *Design and Analysis of Experiment*, John Wiley & Sons, Inc., New York.
- Park, K.H., Olortegui-Yume, J., Yoon, M.C., Kwon, P., 2010, "A study on droplets and their distribution for minimum quantity lubrication(MQL)," *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, pp. 824-833.
- Park, S.H., 1996, *Robust Design and Analysis for Quality Engineering*, 1st edition, Chapman & Hall, London.
- Rochim, T., 2001, *Spesifikasi, Metrologi, dan Kontrol Kualitas Geometrik*, Institut Teknologi Bandung, Bandung.
- Rochim, T., 1993, *Teori dan Teknologi Proses Pemesinan*, Institut Teknologi Bandung, Bandung.
- Ross, P.J., 2008, *Taguchi Technique for Quality Engineering*, 7th edition, McGraw-Hill International Edition, US.
- Rowe, W.B., 2009, *Principles of Modern Grinding Technology*, William Andrew, USA.
- Sadeghi, M.H., Tawakoli, T., Hadad, M.J., Vesali, A., Emami, M., Shajari, S., 2010, "An investigation on surface grinding of AISI 4140 hardened steel using minimum quantity lubrication-MQL technique,"

International Journal of Material Forming, 3(4), pp. 241-251.

Soejanto, I., 2009, *Desain Eksperimen dengan Metode Taguchi*, Graha Ilmu, Yogyakarta.

Tawakoli, T., Hadad, M.J., Sadeghi, M.H., Daneshi, A., Stöckert, S., Rasifard, A., 2009, "An experimental investigation of the effects of workpiece and grinding parameters on minimum quantity lubrication-MQL grinding," *International Journal of Machine Tool & Manufacture*, Vol. 49, pp. 924-932.

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

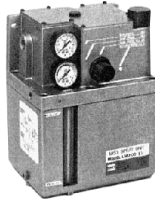
LAMPIRAN 1

Spesifikasi Unit *Minimum Quantity Lubrication*

Mist Spray Unit

Series *LMU100/200*

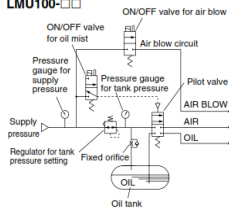
- Intermittent spray to cutting and press gear chains, etc.



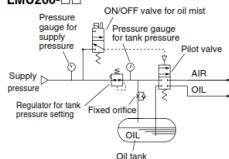
LMU100

Control Circuit

LMU100-□□



LMU200-□□



Standard Specifications

Model	LMU100	LMU200
Inlet air pressure	1.0 MPa	
Oil tank set pressure range	0.05 to 0.2 MPa	
Oil tank capacity (cm ³)	Total capacity: 3000	
Ambient and fluid temperature	Effective capacity: 2500	
Solenoid valve voltage	5 to 50°C	
	100 VAC 50/60Hz, 200 VAC 50/60Hz, 24 VDC	
Port size	SUP Rc 1/4	
	OUT 3 x Rc 1/4	AIR : T0604 (ø6 tube) applicable OIL : T0425 (ø4 tube) applicable AIR BLOW : T0906 (ø6 tube) applicable
Weight (kgf)	8.4	7.9

How to Order

LMU	1	00	-	1	3
Mist spray unit	Air blow circuit	Rated voltage	Float switch		
	1 Available 2 Not available	1 100 VAC (50/60 Hz) 2 200 VAC (50/60 Hz) 5 24 VDC	0 None 3 For the upper and lower limit control (SW turns OFF when the float is on the upper side. SW turns ON when the float goes down. Contact capacity 50 VA AC, 50 W DC)		

Recommended Equipment

It is recommended to use each mist spray unit type with the mixing valves, magnet holders, branch pipes and nylon tubes listed in the table below.

Mist spray unit	Mixing valve	Magnet holder	Branch pipe	Nylon tube
This unit, with an oil tank and a spray ON/OFF control unit, sends oil and air to the mixing valve.	This valve adjusts the amounts of oil and air from the mist spray unit using built-in oil and air needles, and also discharges oil mist from the nozzle.	This magnet holder enables the mixing valve installed on the arm end to be freely attached to the iron and steel parts such as machining tools, etc.	This pipe is used to separate oil and air from the mist spray unit when using several mixing valves.	This tube is used for the air piping and oil piping between the mist spray unit and the mixing valve.
LMU100-□□	LMV110-□□ LMV120-□□	LMH10	LM1-□	OIL--T0425□ AIR--T0604□ AIR BLOW--T0806□
LMU200-□□	LMV210-□□ LMV220-□□	LMH20	LM2-□	OIL--T0425□ AIR--T0604□

AL800
AL900

ALF
ALT

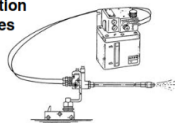
ALD

ALB

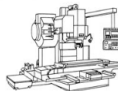
LMU

ALIP

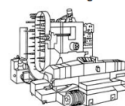
Application Examples



Standing type machining center (Drilling center)



Horizontal machining center

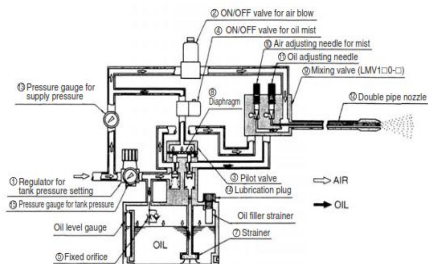


781

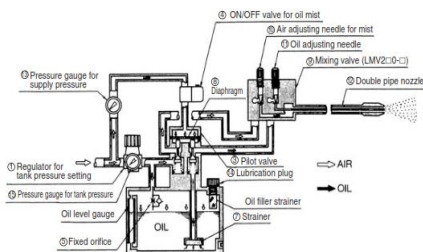
Series **LMU**

Construction/Working Principle

LMU100-□□



LMU200-□□



Working Principle

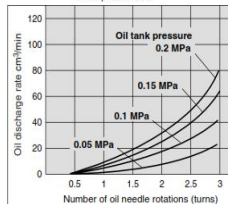
Of the compressed air from the air source, part is directed to the regulator for tank pressure setting (1), while the rest is directed to the ON/OFF valve for oil mist (4), which operates the ON/OFF valve for the air blow circuit (2) and the pilot valve for the mixing circuit (3). Compressed air at a prescribed setting determined by the regulator for tank pressure setting (1) passes through the fixed orifice (5) and gradually fills the oil tank (6), applying pressure to the OIL surface. The OIL in the tank passes through the strainer (7) and is drawn into the pilot valve (3). Operating the ON/OFF valve for oil mist (4) at this point will cause operating signal pressure to be conducted into the pilot valve (3), pushing the diaphragm (8) downwards, and as a result the compressed air from pilot valve (3) and the oil from the opened valve will flow through their respective conduits and be drawn into the mixing valve (9).

Air and oil are adjusted with varying quantities by the air for mist from the mixing valve (9) and oil adjustment needles (10) and (11). With dual piping from the mixing valve (9) to the dual pipe nozzle (12), compressed air passes through the outside while oil passes through the inside, and at the tip of the dual pipe nozzle (12) they are sprayed out as a fine mist by the discharged air.

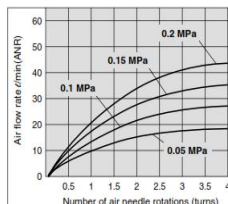
To remove cutting chips, operate the ON/OFF valve for air blow (2), which will cause the supplied compressed air to be drawn directly into the mixing valve (9) and blown out as air through the external piping of the dual pipe nozzle (12). To replenish oil, loosen the oil supply plug (14) to discharge the compressed air from inside the tank through the oil supply plug's side hole. Since it flows gradually from the fixed orifice (5) into the interior of the tank, it is easy to replenish oil from the oil supply hole.

Oil Discharge Rate (Representative Value)

Conditions: Oil: Turbine oil class 1 ISO VG32
Oil temperature: 26°C



Air flow rate (Representative Value)



Handling Precautions

Mounting

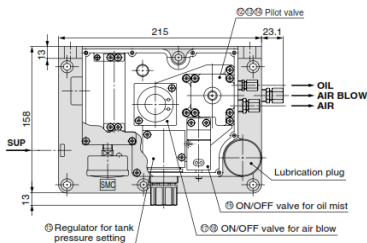
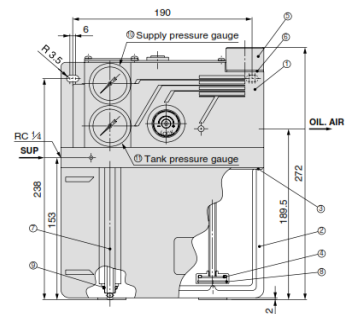
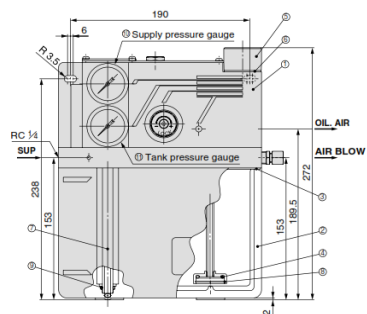
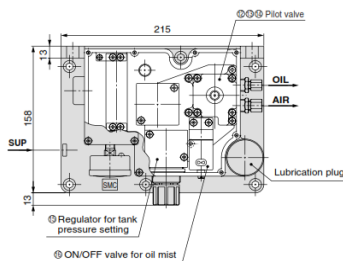
- Be sure to mount an air filter corresponding to 5mm (equivalent to the SMC AF20) on the SUP side of the mist spray unit.

Adjustment

- After loosening the tank's pressure-setting handle (by rotating it to the left), introduce air from the air source. Use the tank's pressure-setting handle and set the range from 0.05 to 0.2 MPa, set each control valve to ON (manual operation or energized), and inspect carefully to make sure there is no looseness in the fittings at each connecting point. At this time, be sure the air and oil adjustment needles of the mixing valve are in a completely closed position (by rotating it to the right).

Lubrication

- Completely release air in the OIL pipe. Even small amounts of air in the OIL pipe will cause oil to dribble. Fully open the oil adjustment needle of the mixing valve, and turn the ON/OFF valve for oil mist generation to the ON position, or press and hold down the manual button to release all air from inside the OIL pipe. If air buildup from use of branching pipes, etc. takes place inside the OIL pipe, mount an air release valve at the highest position and let the air out. Be sure to carry out this operation when replenishing the oil after the oil tank becomes empty.

Mist Spray Unit **Series LMU****Dimensions/Parts List****LMU100****LMU200****Main Parts List**

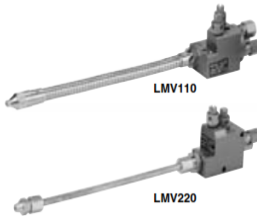
No.	Description	Material	Note
1	Mist spray body	Aluminum die-casted	Platinum silver coated
2	Mist spray tank	Aluminum die-casted	Platinum silver coated

Spare Parts/Replacement Parts Part No.

No.	Description	Material	Qty.	Part no.	
				LMU100	LMU200
3	Body seal	NBR	1	81021-3	
4	Element	Bronze	1	81021-6	
5	Lubrication plug	Brass	1	81021-7	
6	Filter seal	—	1	81021-8	
7	Level gauge	Hard glass	1	81021-9	
8	Type C retaining ring for hole	Stainless steel	1	JIS B2804 Nominal 30	
9	O-ring	FKM	2	JIS B2401 P11	
10	Pressure gauge	—	1	G40-10-01	
11	Pressure gauge	—	1	G40-3-01-X289	
12	Pilot valve	—	1	81022P	
13	O-ring	NBR	1	JIS B2401 P3	
14	O-ring	FKM	2	JIS B2401 P12	
15	Regulator	—	1	INA-13-717	
16	Solenoid valve	—	1	VO301-00 G-X212	
17	Solenoid valve	—	1	VO315-00 G	
18	O-ring	NBR	4	JIS B2401 P8	

AL800
AL900
ALF
ALT
ALD
ALB
LMU
ALIP

Mixing Valve: Series LMV



Specifications

Inlet air pressure		0.3 MPa Max.
Ambient and fluid temperature		5 to 60°C
Port size	AIR	T0604 (ø6 tube) applicable
	OIL	T0425 (ø4 tube) applicable
	AIR BLOW	T0806 (ø8 tube) applicable

How to Order

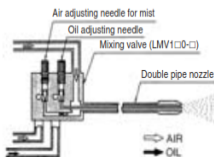
LMV 1 1 0-20

● **Mixing valve**
 ● **Air blow circuit**
 ● **Nozzle tubing construction**
 ● **Nozzle tubing length: L**

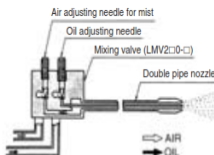
1	Available	20	200 mm
2	Not available	25	250 mm
		30	300 mm
		35	350 mm

Construction

LMV1□0/With air blow circuit

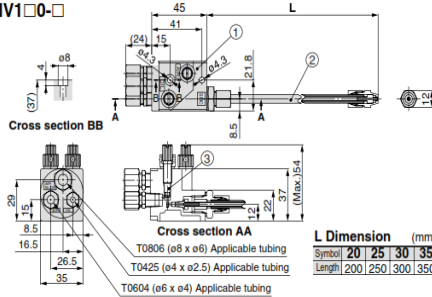


LMV2□0/Without air blow circuit

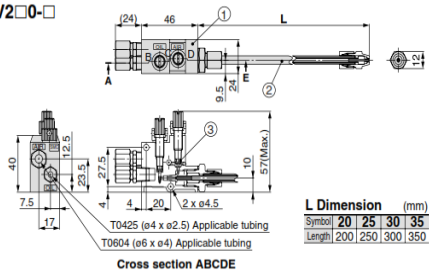


Dimensions

LMV1□0-□



LMV2□0-□



Main Parts List

No.	Description	Material	Note
1	Mixing valve body	Aluminum die-casted	Platinum silver coated

Spare Parts/Replacement Parts Part No.

No.	Description	Material	Qty.	Part no.	
				LMV□10	LMV□20
2	Flexible nozzle assembly	—	1	81023-2A-1 to 4 ^{Note 1)}	—
	Copper piping nozzle assembly	—	1	—	81023-31A-1 to 4 ^{Note 1)}
3	O-ring	EKM	2	123116-2	

Note 1) Numbers indicate nozzle lengths. -1: 200 mm, -2: 250 mm, -3: 300 mm, -4: 350 mm



LAMPIRAN 2

Tabel Hasil Pengukuran Kekasaran Permukaan Replikasi 1

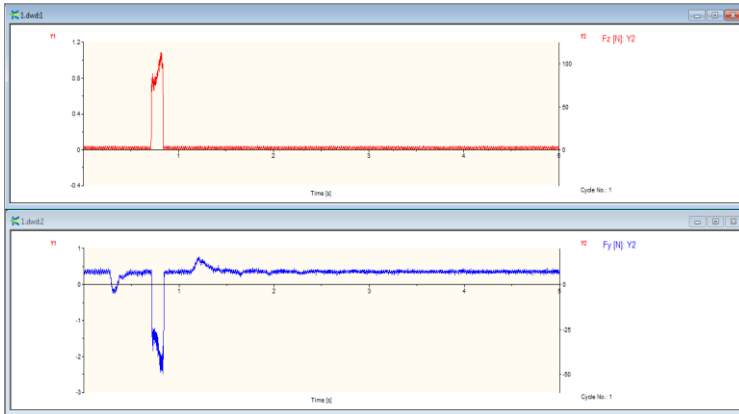
Variabel Proses			Respon Kekasaran permukaan (μm)												
Pendinginan	Kecepatan Makan	Kedalaman Potong (mm)	A				B				C				Rata-rata Total
			1	2	3	Rata-rata	1	2	3	Rata-rata	1	2	3	Rata-rata	
Dry	150	0.01	0.56	0.56	0.53	0.55	0.65	0.55	0.57	0.59	0.56	0.59	0.59	0.58	0.57
		0.03	0.72	0.64	0.7	0.69	0.64	0.65	0.67	0.65	0.62	0.64	0.55	0.60	0.65
		0.06	0.68	0.72	0.67	0.69	0.75	0.7	0.71	0.72	0.68	0.62	0.74	0.68	0.70
	200	0.01	0.63	0.5	0.6	0.58	0.63	0.53	0.56	0.57	0.65	0.59	0.67	0.64	0.60
		0.03	0.72	0.61	0.68	0.67	0.63	0.66	0.65	0.65	0.61	0.68	0.69	0.66	0.66
		0.06	0.55	0.62	0.65	0.61	0.77	0.85	0.86	0.83	0.77	0.78	0.71	0.75	0.73
	250	0.01	0.64	0.62	0.7	0.65	0.91	0.77	0.65	0.78	0.53	0.58	0.58	0.56	0.66
		0.03	0.75	0.84	0.79	0.79	0.88	0.78	0.79	0.82	0.78	0.87	0.76	0.80	0.80
		0.06	1.32	1.01	0.84	1.06	1.03	1.16	0.92	1.04	0.9	0.75	0.77	0.81	0.97
MQL	150	0.01	0.64	0.6	0.57	0.60	0.71	0.73	0.66	0.70	0.62	0.54	0.67	0.61	0.64
		0.03	0.66	0.59	0.73	0.66	0.6	0.69	0.77	0.69	0.69	0.67	0.78	0.71	0.69
		0.06	0.98	0.93	0.94	0.95	0.97	0.99	0.81	0.92	0.94	1.07	0.93	0.98	0.95
	200	0.01	0.73	0.78	0.77	0.76	0.72	0.69	0.67	0.69	0.77	0.71	0.6	0.69	0.72
		0.03	0.92	0.8	0.85	0.86	0.79	0.93	0.79	0.84	0.88	0.85	0.86	0.86	0.85
		0.06	1.05	1	0.97	1.01	1.16	1.46	1.49	1.37	1.29	0.94	0.89	1.04	1.14
	250	0.01	0.64	0.73	0.95	0.77	0.78	0.82	0.89	0.83	0.88	0.59	0.76	0.74	0.78
		0.03	0.96	0.99	0.93	0.96	0.92	1.08	0.97	0.99	0.88	0.89	0.81	0.86	0.94
		0.06	1.46	1.43	1.39	1.43	1.48	1.5	1.32	1.43	1.28	1.39	1.31	1.33	1.40

Tabel Hasil Pengukuran Kekasaran Permukaan Replikasi 2

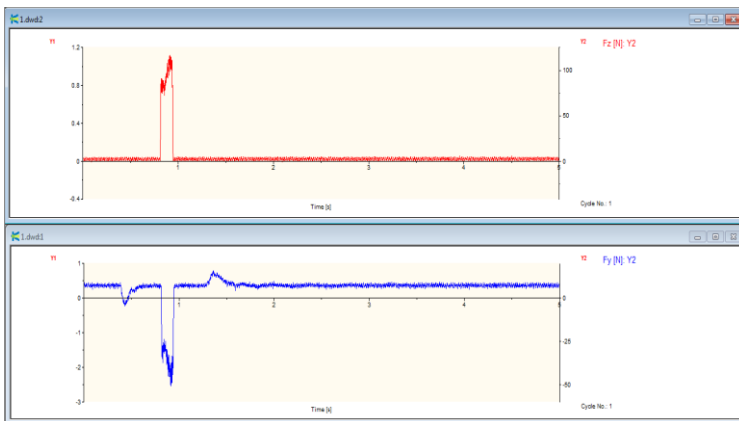
Variabel Proses			Respon Kekasaran permukaan (μm)												
Pendinginan	Kecepatan Makan	Kedalaman Potong (mm)	A				B				C				Rata-rata Total
			1	2	3	Rata-rata	1	2	3	Rata-rata	1	2	3	Rata-rata	
Dry	150	0.01	0.54	0.55	0.55	0.55	0.58	0.49	0.52	0.53	0.56	0.61	0.54	0.57	0.55
		0.03	0.52	0.54	0.45	0.50	0.64	0.6	0.68	0.64	0.74	0.89	0.95	0.86	0.67
		0.06	0.67	0.65	0.6	0.64	0.74	0.73	0.69	0.72	0.74	0.72	0.96	0.81	0.72
	200	0.01	0.68	0.72	0.66	0.69	0.67	0.62	0.72	0.67	0.7	0.61	0.65	0.65	0.67
		0.03	0.74	0.66	0.74	0.71	0.71	0.7	0.62	0.68	0.69	0.68	0.78	0.72	0.70
		0.06	0.74	0.62	0.69	0.68	0.67	0.86	0.73	0.75	0.76	0.89	0.8	0.82	0.75
	250	0.01	0.75	0.72	0.79	0.75	0.75	0.7	0.78	0.74	0.78	0.65	0.71	0.71	0.74
		0.03	0.81	0.85	0.83	0.83	0.9	0.81	0.9	0.87	0.73	0.75	0.81	0.76	0.82
		0.06	1.37	1.08	1	1.15	0.77	0.72	0.84	0.78	0.67	0.7	0.96	0.78	0.90
MQL	150	0.01	0.87	0.46	0.35	0.56	0.42	0.54	0.79	0.58	0.68	0.74	0.64	0.69	0.61
		0.03	0.63	0.64	0.73	0.67	0.76	0.71	0.83	0.77	0.77	0.76	0.75	0.76	0.73
		0.06	0.99	0.9	0.96	0.95	0.91	0.95	0.98	0.95	0.92	0.94	0.96	0.94	0.95
	200	0.01	0.75	0.81	0.79	0.78	0.8	0.72	0.69	0.74	0.76	0.7	0.75	0.74	0.75
		0.03	1.02	0.69	0.67	0.79	0.47	0.4	0.38	0.42	0.92	1.17	0.35	0.81	0.67
		0.06	0.92	1.01	1.08	1.00	1.09	0.97	0.98	1.01	0.98	1.05	1.03	1.02	1.01
	250	0.01	0.81	0.97	0.79	0.86	0.8	0.76	0.86	0.81	0.89	0.85	0.83	0.86	0.84
		0.03	1.05	0.99	1.02	1.02	0.98	1.04	1.07	1.03	1.06	1	0.99	1.02	1.02
		0.06	1.5	1.64	1.64	1.59	1.61	1.6	1.47	1.56	1.11	1.53	1.57	1.40	1.52

LAMPIRAN 3

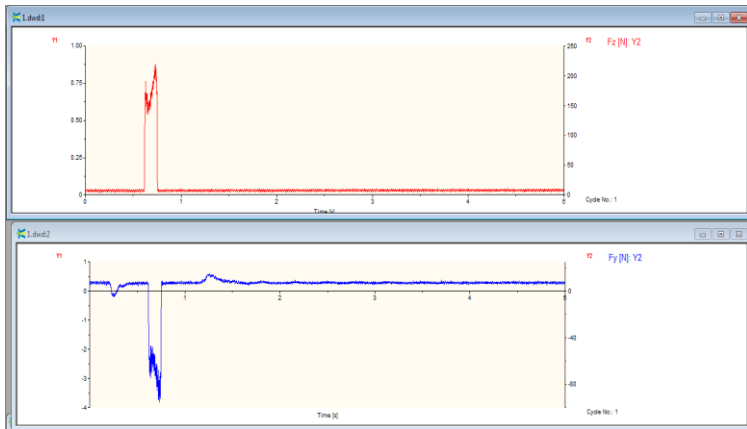
Grafik Hasil Pengukuran Gaya Tangensial dan Gaya Normal



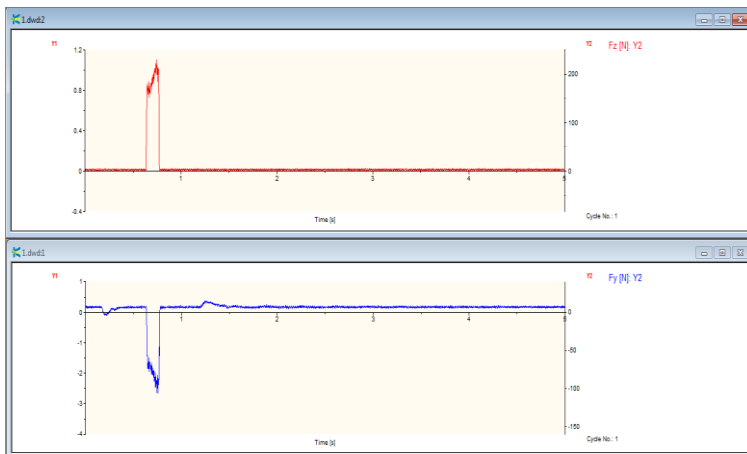
Gambar gaya potong kombinasi 1.1.1 Replikasi 1



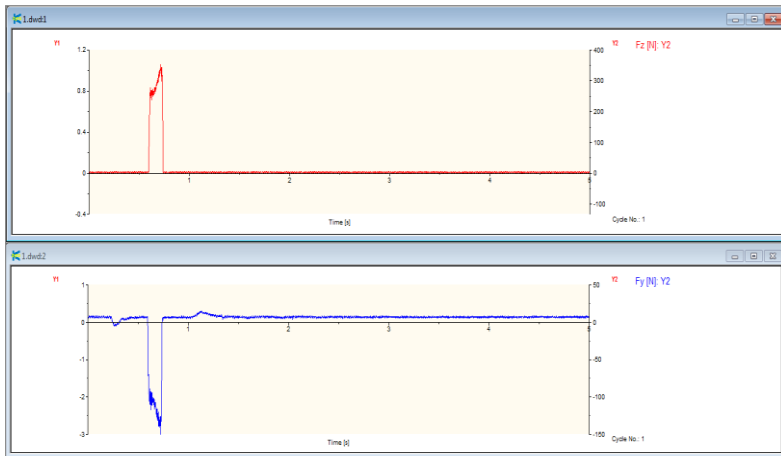
Gambar gaya potong kombinasi 1.1.1 Replikasi 2



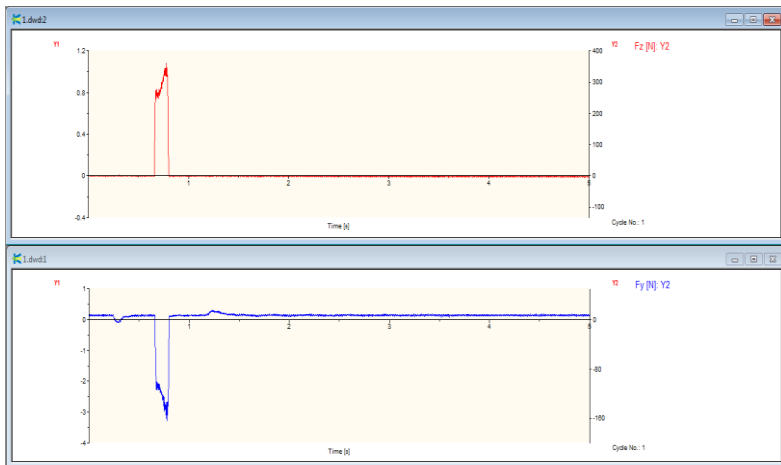
Gambar gaya potong kombinasi 1.1.2 Replikasi 1



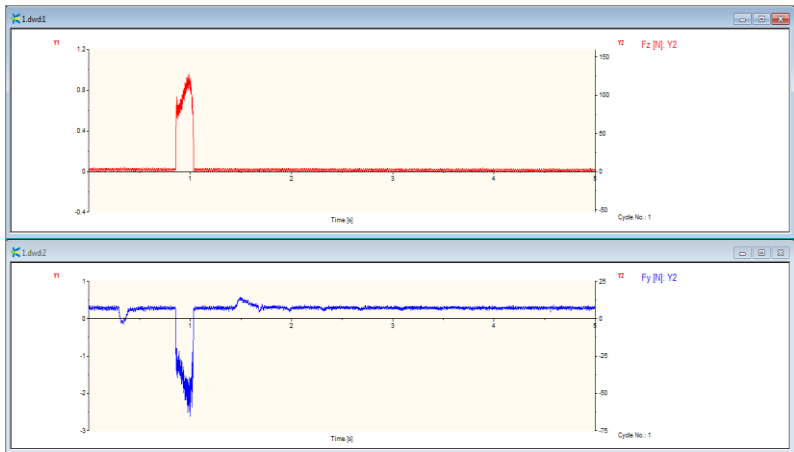
Gambar gaya potong kombinasi 1.1.2 Replikasi 2



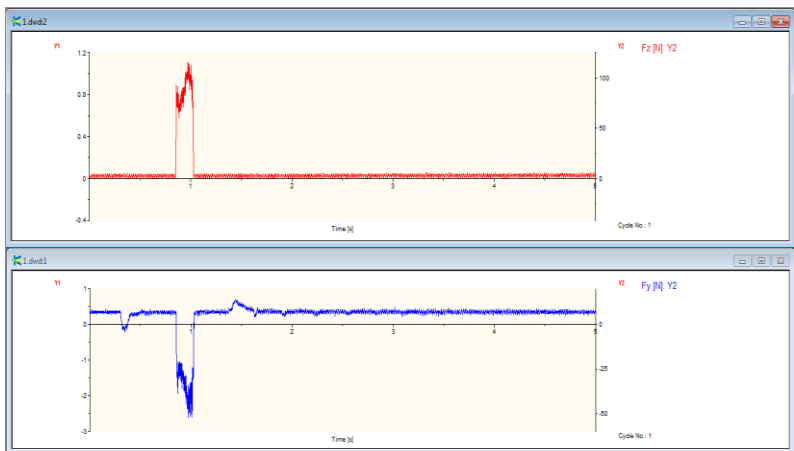
Gambar gaya potong kombinasi 1.1.3 Replikasi 1



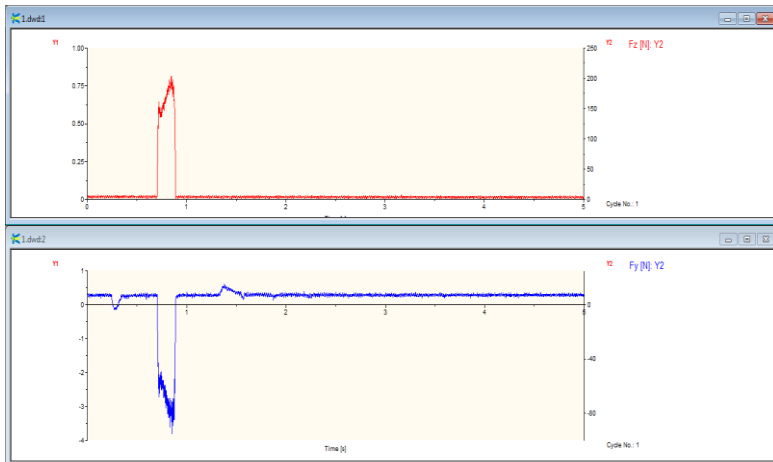
Gambar gaya potong kombinasi 1.1.3 Replikasi 2



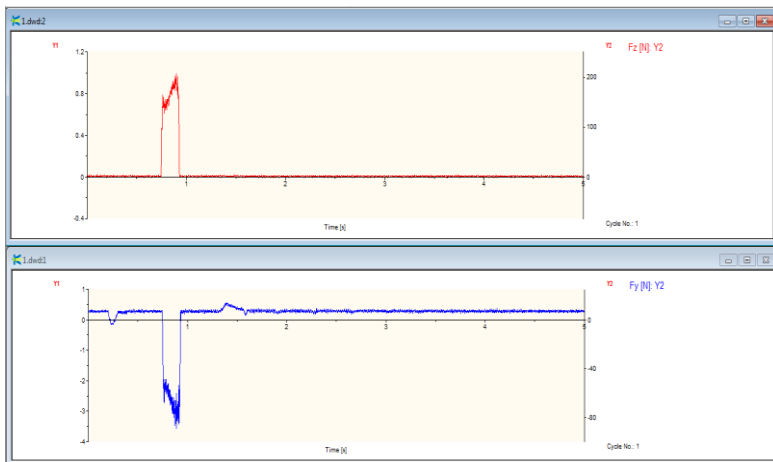
Gambar gaya potong kombinasi 1.2.1 Replikasi 1



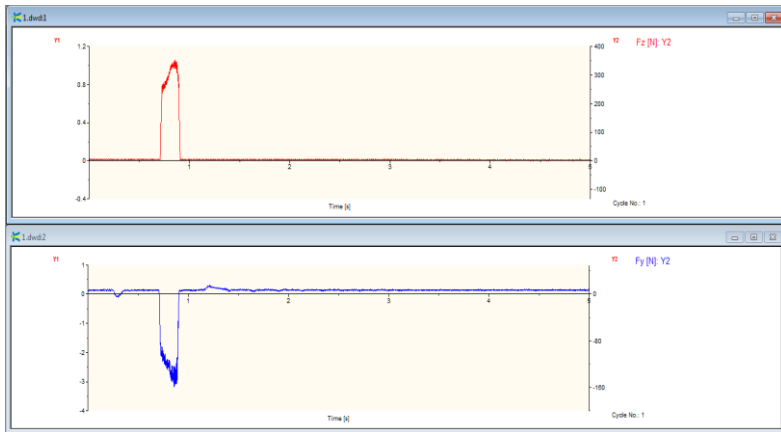
Gambar gaya potong kombinasi 1.2.1 Replikasi 2



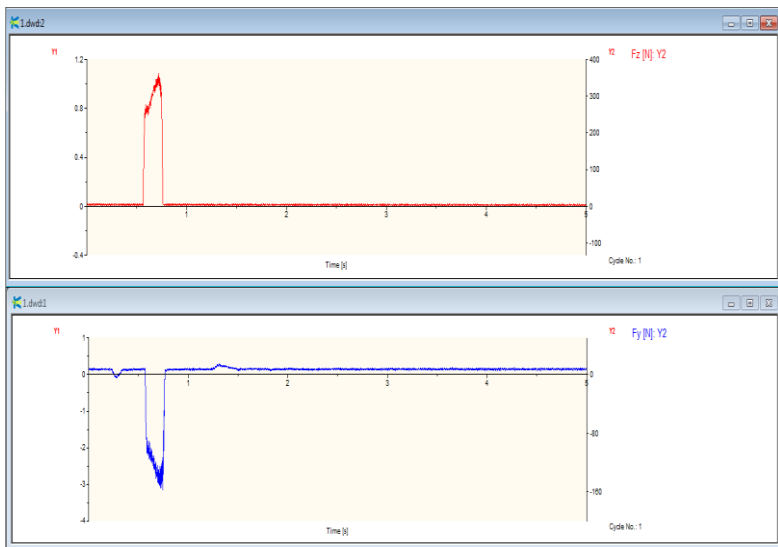
Gambar gaya potong kombinasi 1.2.2 Replikasi 1



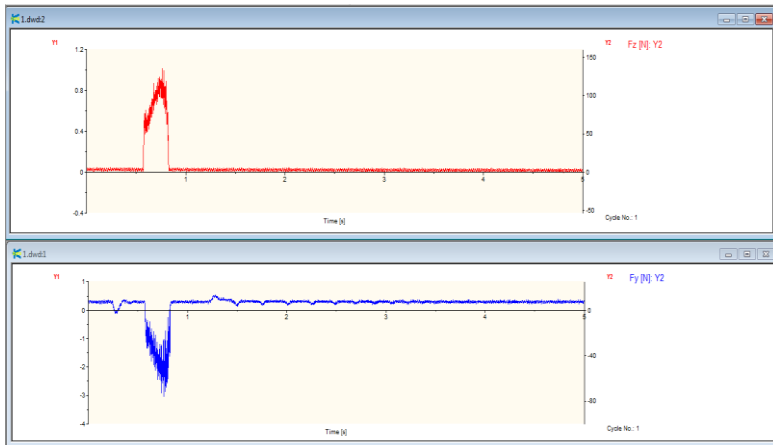
Gambar gaya potong kombinasi 1.2.2 Replikasi 2



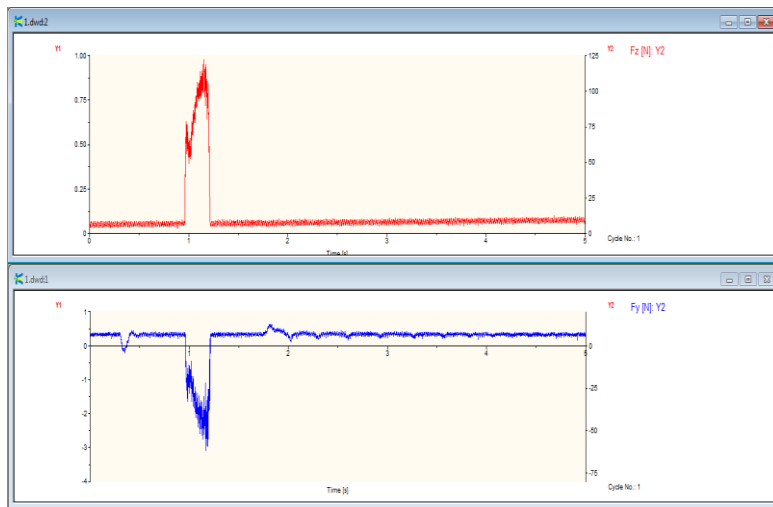
Gambar gaya potong kombinasi 1.2.3 Replikasi 1



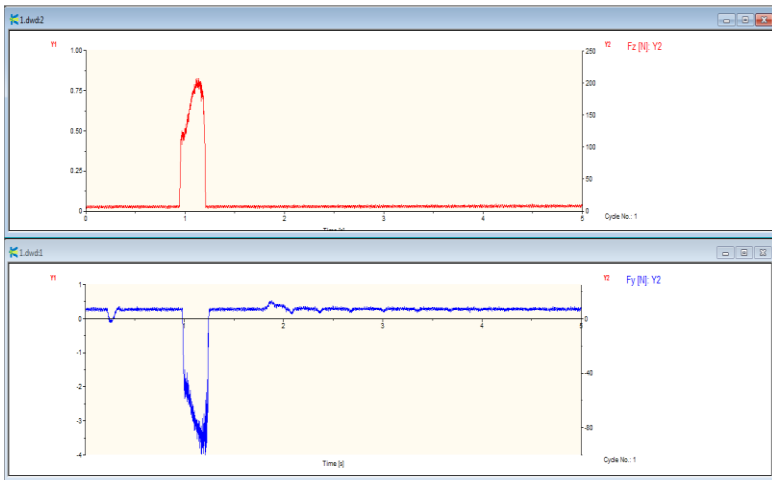
Gambar gaya potong kombinasi 1.2.3 Replikasi 2



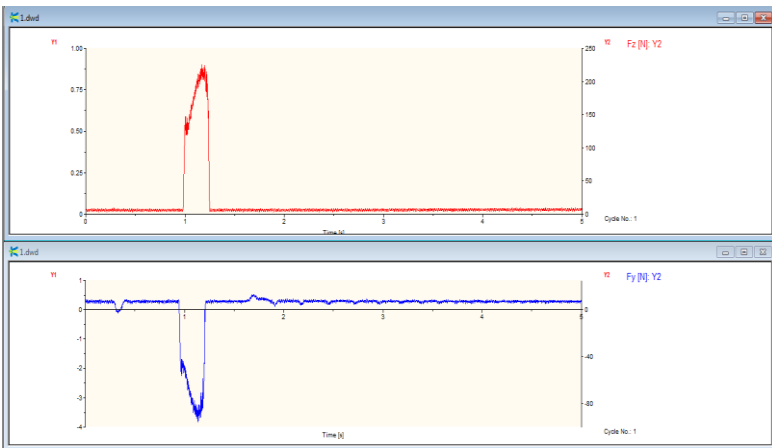
Gambar gaya potong kombinasi 1.3.1 Replikasi 1



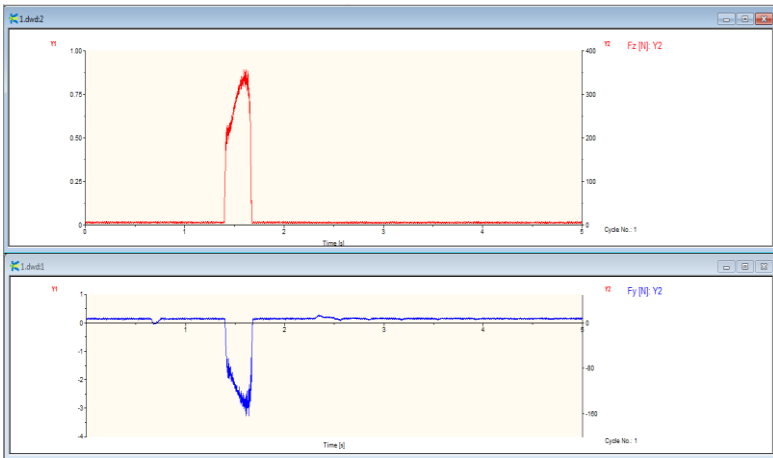
Gambar gaya potong kombinasi 1.3.1 Replikasi 2



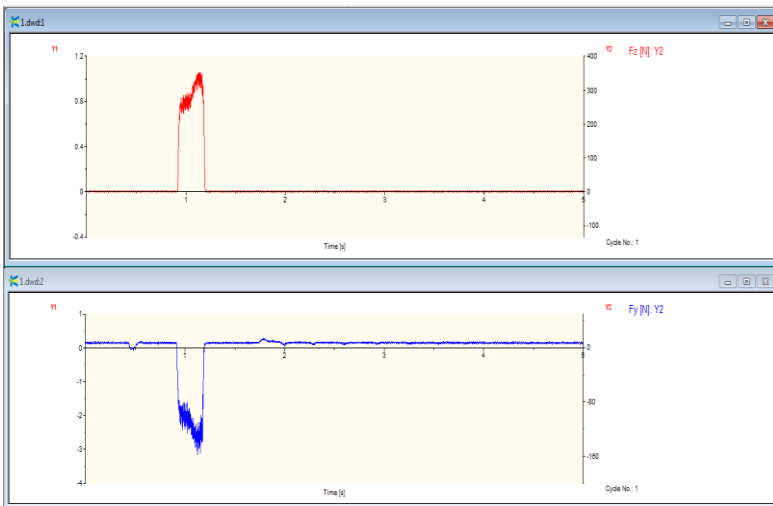
Gambar gaya potong kombinasi 1.3.2 Replikasi 1



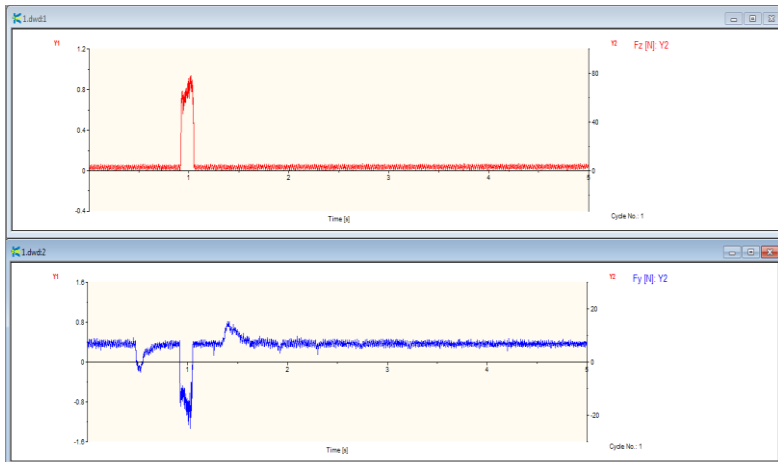
Gambar gaya potong kombinasi 1.3.2 Replikasi 2



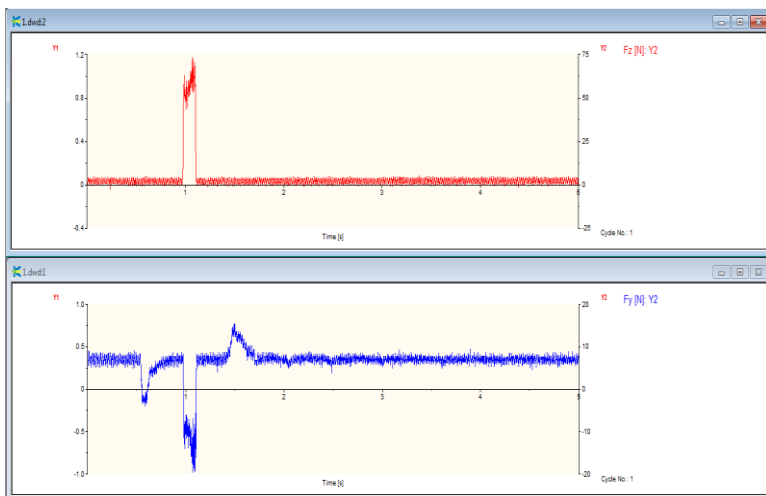
Gambar gaya potong kombinasi 1.3.3 Replikasi 1



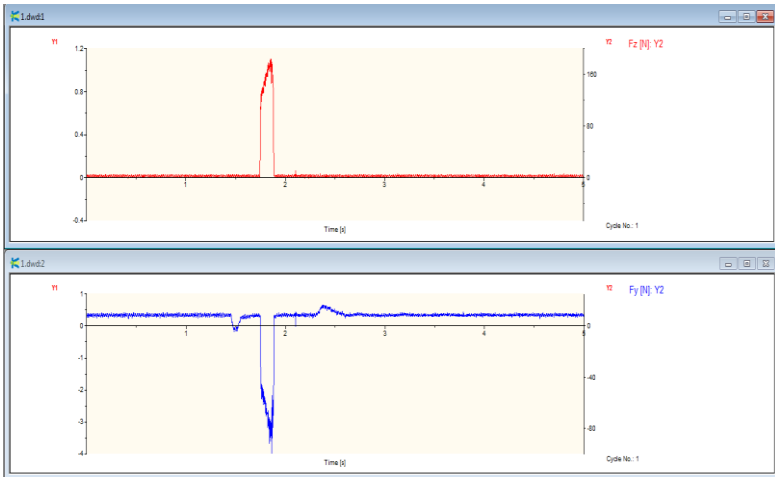
Gambar gaya potong kombinasi 1.3.3 Replikasi 2



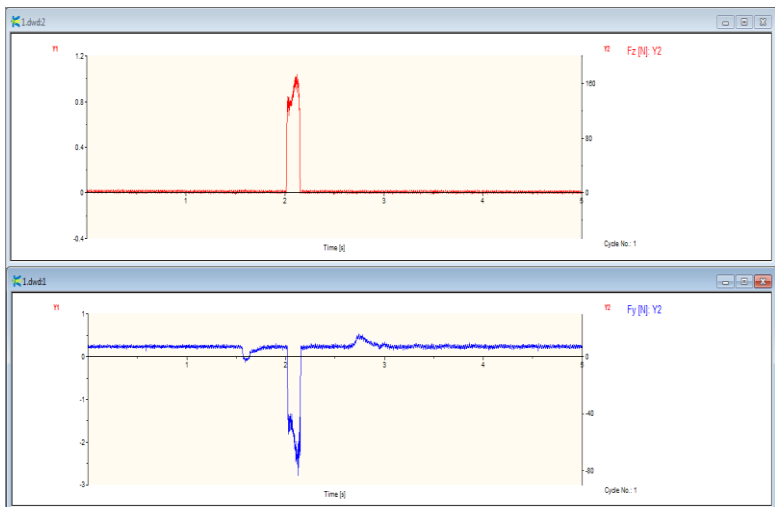
Gambar gaya potong kombinasi 2.1.1 Replikasi 1



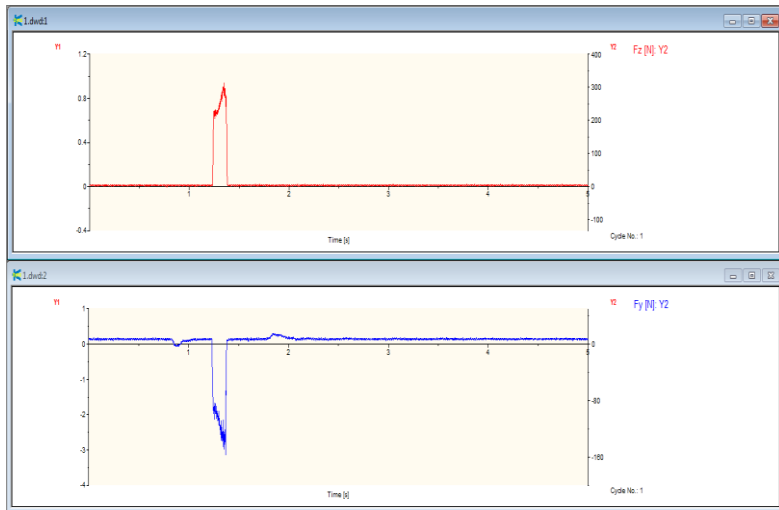
Gambar gaya potong kombinasi 2.1.1 Replikasi 2



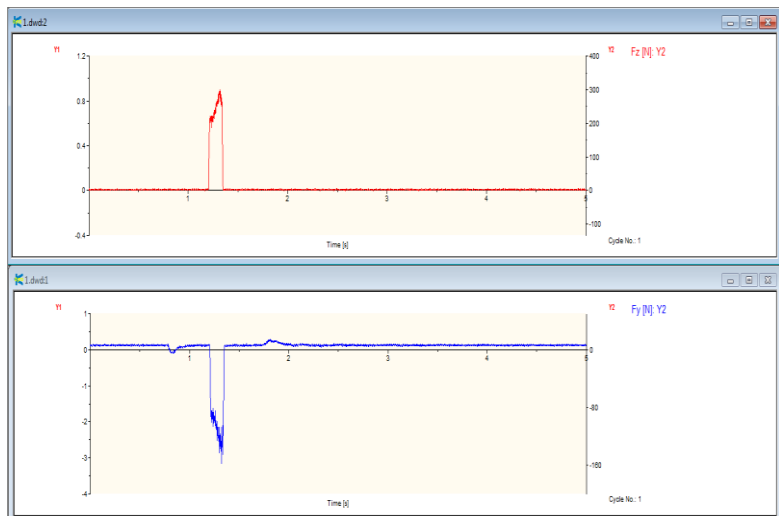
Gambar gaya potong kombinasi 2.1.2 Replikasi 1



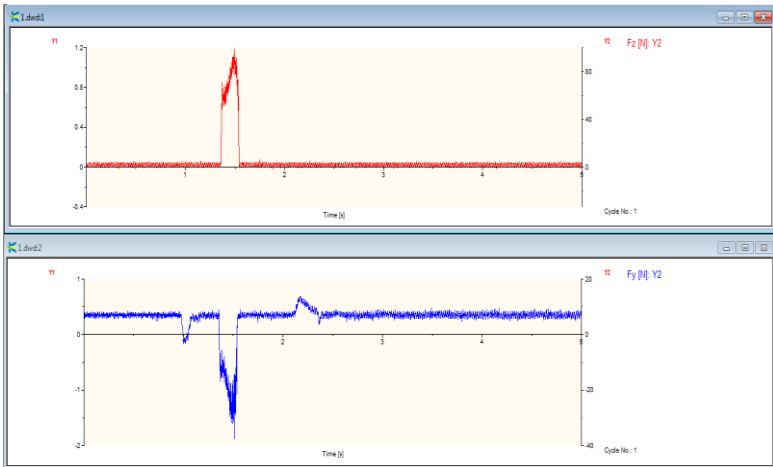
Gambar gaya potong kombinasi 2.1.2 Replikasi 2



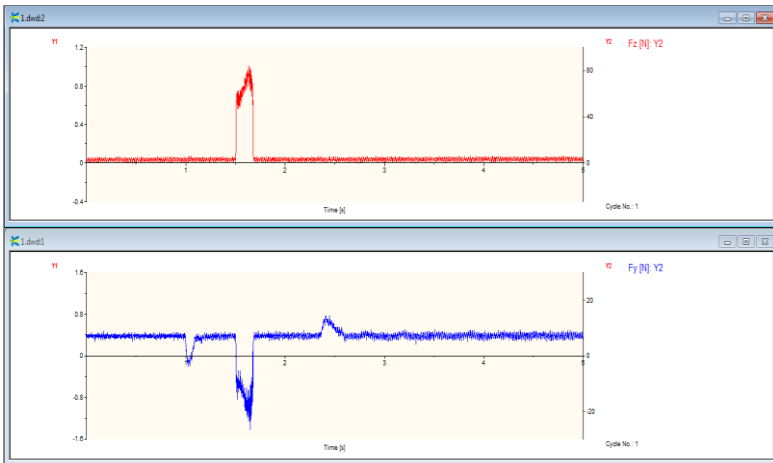
Gambar gaya potong kombinasi 2.1.3 Replikasi 1



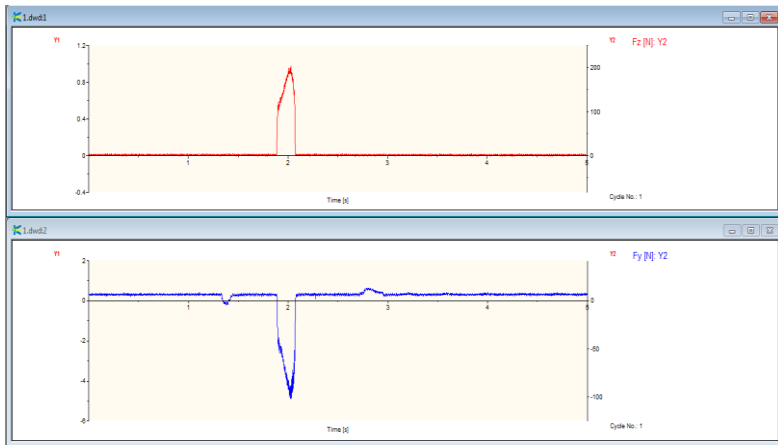
Gambar gaya potong kombinasi 2.1.3 Replikasi 2



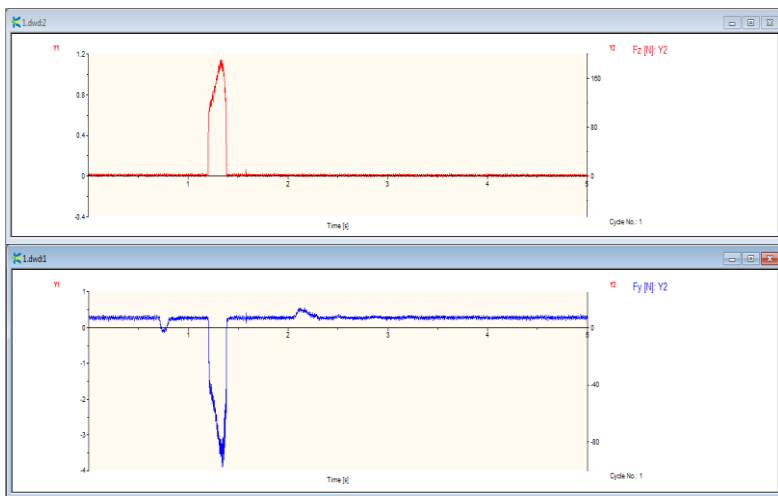
Gambar gaya potong kombinasi 2.2.1 Replikasi 1



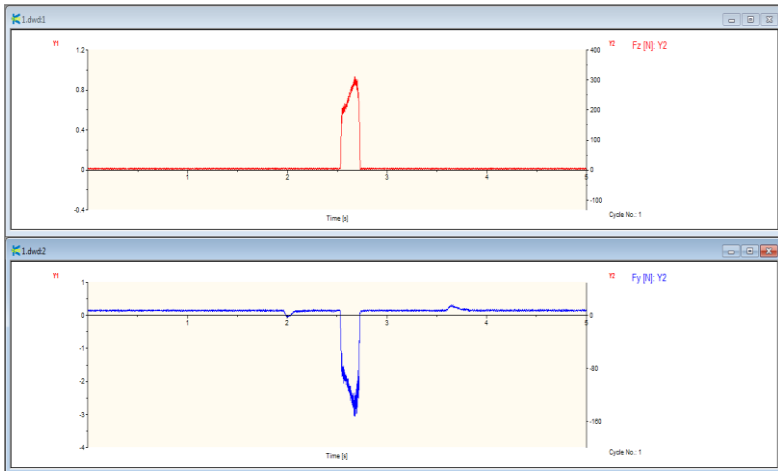
Gambar gaya potong kombinasi 2.2.1 Replikasi 2



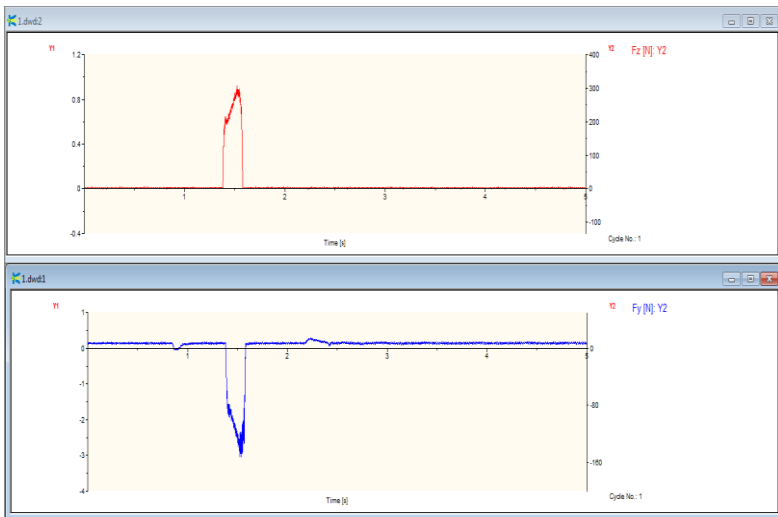
Gambar gaya potong kombinasi 2.2.2 Replikasi 1



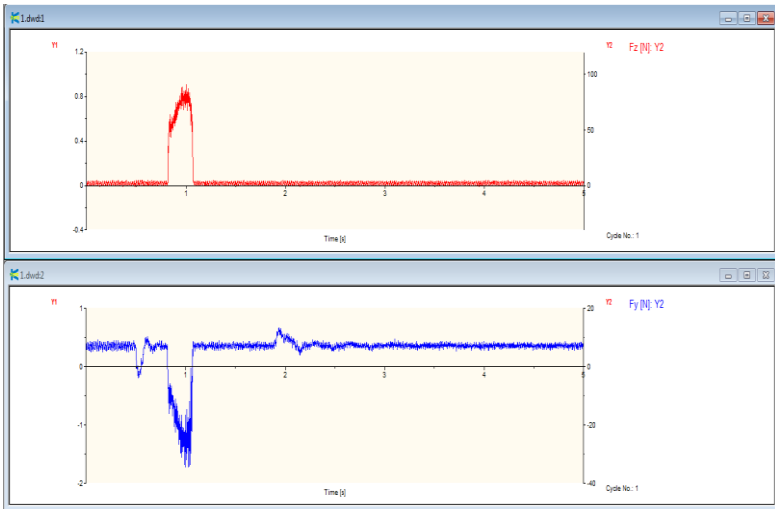
Gambar gaya potong kombinasi 2.2.2 Replikasi 2



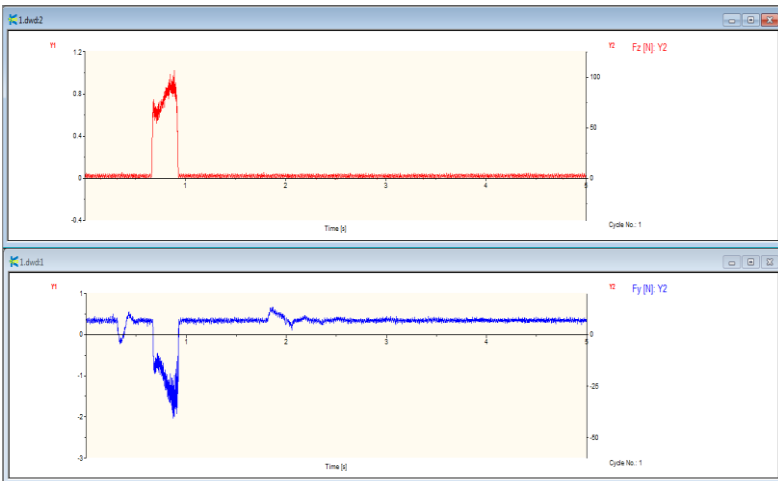
Gambar gaya potong kombinasi 2.2.3 Replikasi 1



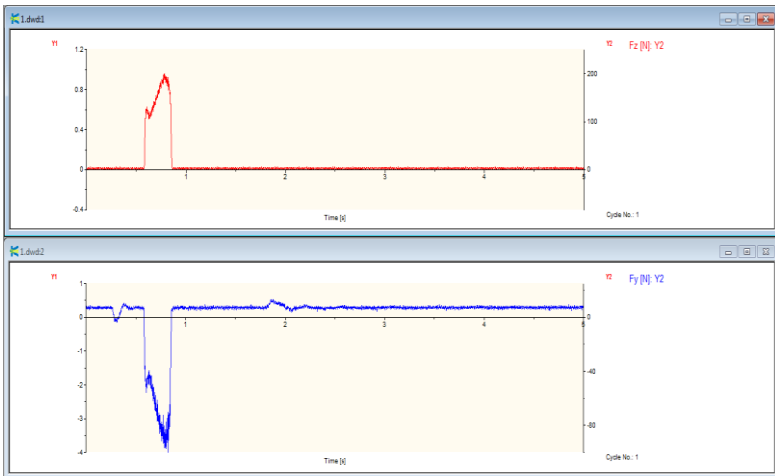
Gambar gaya potong kombinasi 2.2.3 Replikasi 2



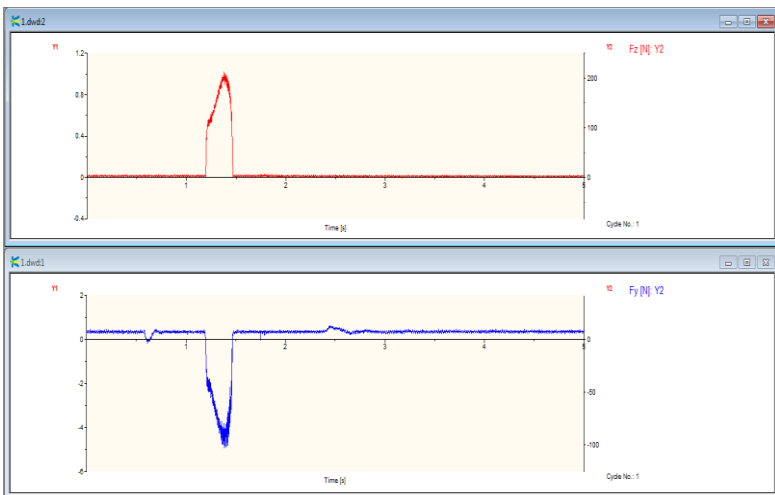
Gambar gaya potong kombinasi 2.3.1 Replikasi 1



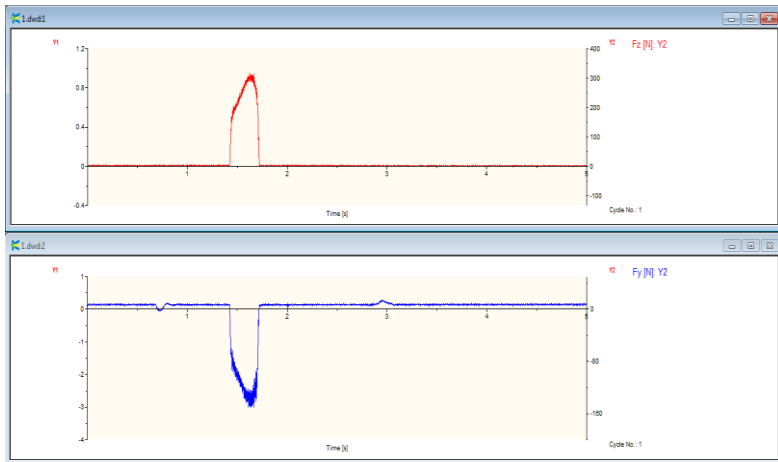
Gambar gaya potong kombinasi 2.3.1 Replikasi 2



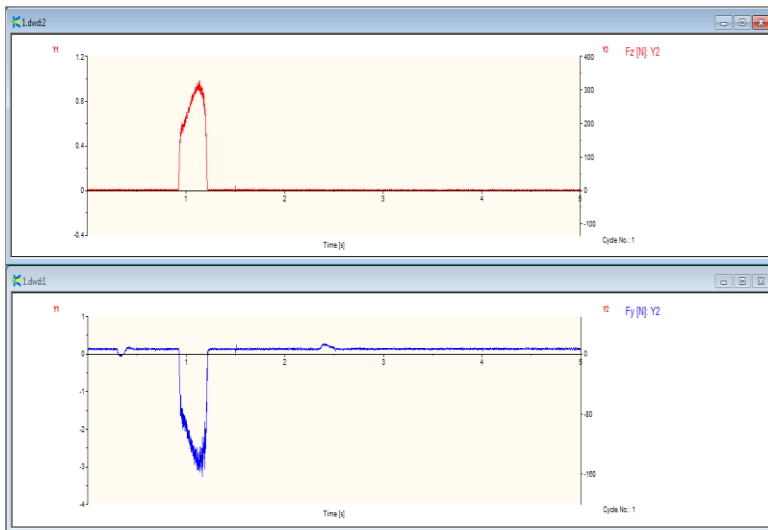
Gambar gaya potong kombinasi 2.3.2 Replikasi 1



Gambar gaya potong kombinasi 2.3.2 Replikasi 2



Gambar gaya potong kombinasi 2.3.3 Replikasi 1



Gambar gaya potong kombinasi 2.3.3 Replikasi 2

LAMPIRAN 4

General Linear Model: Gaya Tangensial versus Metode Pendinginan, Kecepatan Makan, Kedalaman Potong

Factor Information

Factor	Type	Levels	Values
Metode Pendinginan	Fixed	2	Dry, MQL
Kecepatan Makan	Fixed	3	150, 200, 250
Kedalaman Potong	Fixed	3	0.01, 0.03, 0.06

Analysis of Variance

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Metode Pendinginan	1	1050.6	1050.6	77.83	0.000
Kecepatan Makan	2	446.7	223.4	16.55	0.000
Kedalaman Potong	2	32642.8	16321.4	1209.07	0.000
Error	30	405.0	13.5		
Total	35	34545.2			

Model Summary

S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
3.67412	98.83%	98.63%	98.31%

Comparisons for Gaya Tangensial

Tukey Pairwise Comparisons: Response = Gaya Tangensial, Term = Metode Pendinginan

Grouping Information Using the Tukey Method and 95% Confidence

Metode

Pendinginan	N	Mean	Grouping
Dry	18	69.9378	A
MQL	18	59.1333	B

Means that do not share a letter are significantly different.

Tukey Pairwise Comparisons: Response = Gaya Tangensial, Term = Kecepatan Makan

Grouping Information Using the Tukey Method and 95% Confidence

Kecepatan Makan			
	N	Mean	Grouping
250	12	69.0367	A
200	12	64.1342	B
150	12	60.4358	B

Means that do not share a letter are significantly different.

Tukey Pairwise Comparisons: Response = Gaya Tangensial, Term = Kedalaman Potong

Grouping Information Using the Tukey Method and 95% Confidence

Kedalaman Potong			
	N	Mean	Grouping
0.06	12	102.556	A
0.03	12	62.137	B
0.01	12	28.913	C

Means that do not share a letter are significantly different.

General Linear Model: Gaya Normal versus Metode Pendingin, Kecepatan Makan, Kedalaman Potong

Factor Information			
Factor	Type	Levels	Values
Metode Pendinginan	Fixed	2	Dry, MQL
Kecepatan Makan	Fixed	3	150, 200, 250
Kedalaman Potong	Fixed	3	0.01, 0.03, 0.06

Analysis of Variance

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Metode Pendinginan	1	5000	4999.9	150.84	0.000
Kecepatan Makan	2	1052	526.0	15.87	0.000
Kedalaman Potong	2	151767	75883.6	2289.30	0.000
Error	30	994	33.1		
Total	35	158813			

Model Summary

S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
5.75735	99.37%	99.27%	99.10%

Comparisons for Gaya Normal**Tukey Pairwise Comparisons: Response = Gaya Normal,
Term = Metode Pendinginan**

Grouping Information Using the Tukey Method and 95% Confidence

Metode

Pendinginan	N	Mean	Grouping
Dry	18	155.778	A
MQL	18	132.208	B

Means that do not share a letter are significantly different.

**Tukey Pairwise Comparisons: Response = Gaya Normal,
Term = Kecepatan Makan**

Grouping Information Using the Tukey Method and 95% Confidence

Kecepatan

Makan	N	Mean	Grouping
250	12	150.850	A
200	12	143.493	B
150	12	137.637	C

Means that do not share a letter are significantly different.

Tukey Pairwise Comparisons: Response = Gaya Normal, Term = Kedalaman Potong

Grouping Information Using the Tukey Method and 95% Confidence

Kedalaman Potong	N	Mean	Grouping
0.06	12	226.183	A
0.03	12	138.356	B
0.01	12	67.441	C

Means that do not share a letter are significantly different.

Regression Analysis: Gaya Tangensial versus Kecepatan Makan, Kedalaman Potong

Analysis of Variance

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Regression	2	2.04642	1.02321	127.31	0.000
Kecepatan Makan	1	0.03357	0.03357	4.18	0.049
Kedalaman Potong	1	2.01285	2.01285	250.44	0.000
Error	33	0.26523	0.00804		
Total	35	2.31165			

Model Summary

S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
0.0896512	88.53%	87.83%	85.74%

Coefficients

Term	Coef	SE Coef	T-Value	P-Value	VIF
Constant	2.143	0.385	5.57	0.000	
Kecepatan Makan	0.336	0.165	2.04	0.049	1.00
Kedalaman Potong	0.7381	0.0466	15.83	0.000	1.00

Regression Equation
 Gaya Tangensial = 2.143 + 0.336 Kecepatan Makan
 + 0.7381 Kedalaman Potong

Regression Analysis: Gaya Normal versus Kecepatan Makan, Kedalaman Potong

Analysis of Variance

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Regression	2	1.71980	0.85990	365.47	0.000
Kecepatan Makan	1	0.01430	0.01430	6.08	0.019
Kedalaman Potong	1	1.70550	1.70550	724.86	0.000
Error	33	0.07764	0.00235		
Total	35	1.79744			

Model Summary

S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
0.0485063	95.68%	95.42%	94.69%

Coefficients

Term	Coef	SE Coef	T-Value	P-Value	VIF
Constant	2.677	0.208	12.87	0.000	
Kecepatan Makan	0.2195	0.0890	2.47	0.019	1.00
Kedalaman Potong	0.6794	0.0252	26.92	0.000	1.00

Regression Equation

Gaya Normal = 2.677 + 0.2195 Kecepatan Makan
+ 0.6794 Kedalaman Potong

LAMPIRAN 5

General Linear Model: Kekasaran Permukaan versus Jenis Pendinginan, Kecepatan Makan, Kedalaman Potong

Factor Information

Factor	Type	Levels	Values
Jenis Pendinginan	Fixed	2	Dry, MQL
Kecepatan Makan	Fixed	3	150, 200, 250
Kedalaman Potong	Fixed	3	0.01, 0.03, 0.06

Analysis of Variance

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Jenis Pendinginan	1	0.31091	0.310909	30.32	0.000
Kecepatan Makan	2	0.39145	0.195723	19.08	0.000
Kedalaman Potong	2	0.56964	0.284822	27.77	0.000
Error	30	0.30767	0.010256		
Total	35	1.57967			

Model Summary

S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
0.101271	80.52%	77.28%	71.95%

Fits and Diagnostics for Unusual Observations

	Kekasaran			Std
Obs	Permukaan	Fit	Resid	Resid
36	1.5189	1.2123	0.3066	3.32

R Large residual

Tukey Pairwise Comparisons: Response = Kekasaran Permukaan, Term = Jenis Pendinginan

Grouping Information Using the Tukey Method and 95% Confidence

Jenis Pendinginan	N	Mean	Grouping
MQL	18	0.900185	A
Dry	18	0.714321	B

Means that do not share a letter are significantly different

Tukey Pairwise Comparisons: Response = Kekasaran Permukaan, Term = Kecepatan Makan

Grouping Information Using the Tukey Method and 95% Confidence

Kecepatan			
Makan	N	Mean	Grouping
250	12	0.949167	A
200	12	0.771019	B
150	12	0.701574	B

Means that do not share a letter are significantly different.

Tukey Pairwise Comparisons: Response = Kekasaran Permukaan, Term = Kedalaman Potong

Grouping Information Using the Tukey Method and 95% Confidence

Kedalaman			
Potong	N	Mean	Grouping
0.06	12	0.977407	A
0.03	12	0.767130	B
0.01	12	0.677222	B

Means that do not share a letter are significantly different.

Regression Analysis: Kekasaran Permukaan versus Kecepatan Makan, Kedalaman Potong

Analysis of Variance					
Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Regression	2	0.21598	0.107992	25.84	0.000
Kecepatan Makan	1	0.08976	0.089757	21.47	0.000
Kedalaman Potong	1	0.12623	0.126226	30.20	0.000
Error	33	0.13794	0.004180		
Total	35	0.35392			

Model Summary			
S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
0.0646531	61.03%	58.66%	53.71%

Coefficients

Term	Coef	SE Coef	T-Value	P-Value	VIF
Constant	-1.073	0.277	-3.87	0.000	1.00
Kecepatan Makan	0.550	0.119	4.63	0.000	1.00
Kedalaman Potong	0.1848	0.0336	5.50	0.000	1.00

Regression Equation

Kekasaran Permukaan = -1.073 + 0.550 Kecepatan Makan
 + 0.1848 Kedalaman Potong

BIODATA PENULIS



Adib Abdullah Hafidz lahir di Karawang, 14 Agustus 1992 merupakan anak keddua dari delapan bersaudara dari pasangan Aceng Husna dan Dwi Sujantiah. Penulis menyelesaikan pendidikan dasar di SDN 07 Lembang pada tahun 2004. Kemudian dilanjutkan pendidikan menengah pertama di SMP Salman Al-Farisi. Lalu dilanjutkan dengan pendidikan menengah atas di SMA Negeri 2 Bandung. Kemudian melanjutkan

Studi Diploma 3 dengan program studi Teknik Mesin di Politeknik Negeri Bandung pada tahun 2010. Penulis juga aktif dalam kegiatan organisasi yaitu tergabung dalam UKM Catur. Kemudian penulis melanjutkan jenjang pendidikan Strata 1 (S1) dengan program lintas jalur di ITS jurusan Teknik Mesin pada tahun 2013. Untuk informasi dan kepentingan penelitian, penulis dapat dihubungi melalui email adibabdullah.hafidz@gmail.com.